



Departamento de Ingeniería Eléctrica
I.T.I: Electrónica

PROYECTO FIN DE CARRERA

Aprovechamiento de la energía de frenado
regenerativo de los trenes de cercanías en
las estaciones La Serna y Parque Polvoranca

Autor: Eduardo Martínez Iglesias

Tutora Universidad: Sandra Castaño

Tutor INECO: Ricardo Campos

Leganés, 08 Octubre de 2012

Agradecimientos

Quiero agradecerle a mi tutora Sandra Castaño, por haber estado pendiente incluso a pesar del parón del proyecto debido a la estancia en el extranjero.

A mi tutor en INECO Ricardo Campos por facilitarme la documentación necesaria para la elaboración del proyecto.

A mi novia Patricia Carrasco, por aguantarme tanto.

A mis amigos, por hacer que la etapa universitaria sea única.

A mi familia, en especial a mis padres Miguel Martinez y Nieves Iglesias.

Resumen del Proyecto

El presente proyecto tiene como objetivo principal estudiar y analizar el proceso de recuperación de energía durante el frenado de los trenes así como los posibles modos de aprovechamiento de esta energía, valorando distintas posibilidades y centrándose en el posible uso de esta energía para la carga de vehículos eléctricos y para la estabilización de los picos de bajo voltaje por el posible uso de trenes cargados con pasajeros en horas punta.

Se pretende realizar un estudio de la energía regenerada, almacenaje y posibles usos, una posible opción sería una estación de carga de vehículos eléctricos (electrolinera), aprovechando la energía producida durante el proceso de frenado de los trenes, a partir de la energía cinética que el tren ha acumulado previamente. Para ello es necesario que el sistema incorpore la tecnología necesaria que permita reciclar esa energía de frenado que de otro modo se desaprovecharía.

Los trenes eléctricos están conectados en todo momento a una catenaria y por ende a la Red Eléctrica, esto permite diversas soluciones a la hora de abordar este problema. La energía generada puede ser almacenada, también puede emplearse para alimentar a otros elementos del sistema ferroviario e incluso podría ser devuelta a la red de abastecimiento para ser aprovechada por otros consumidores.

En concreto, este proyecto analiza la estación más favorable de la red de Cercanías de Madrid para la incorporación de un sistema de almacenaje de la energía regenerada. Dicha estación es La Serna en la línea C-5.

El sistema para almacenar la energía elegida será mediante Supercondensadores. Una parte de la energía almacenada en estos Supercondensadores se usará para la estabilización del voltaje y para traccionar trenes, y otra con motivo de fomentar el vehículo eléctrico, se usará para abastecer puntos de recarga de vehículos eléctricos.

Abstract

The aim of this project is to study and analyze the energy recovery process during the braking of trains as well as possible ways of reusing this energy, evaluating different possibilities and focusing on the possible use of this energy for electrical vehicle charging and stabilizing low voltage peaks for the possible use of trains loaded with passengers at peak hours.

It consists in a study of the regenerated energy, storage and possible uses, one possible option would be a charging station for electric vehicles, using the energy produced during the braking of trains, from the kinetic energy the train has already accumulated. Therefore it is necessary for the system to incorporate the technology enabling recycle braking energy that would otherwise be wasted.

Electric trains are connected at all times to a catenary and therefore to the Power Grid, this allows various solutions to tackling this problem. The energy generated can be stored, may also be used to feed other elements of the railway system and could even be returned to the supply network to be used by other consumers.

Specifically, this project examines the most favorable station of Madrid's train network to incorporate a system of regenerative energy storage. This station is La Serna on line C-5.

The energy storage system will be chosen by Supercapacitors. A part of the energy stored in these supercapacitors are used to stabilize the voltage and to pull trains, and another occasion to promote electric vehicle will be used to supply charging points for electric vehicles.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--|-----------|
| ÍNDICE GENERAL | 5 |
| INDICE DE FIGURAS..... | 8 |
| INDICE DE TABLAS..... | 11 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. MOTIVACIONES..... | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 1 |
| 1.3. FASES DEL PROYECTO | 1 |
| 1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA | 2 |
| 2. ANÁLISIS REGENERACIÓN DE ENERGÍA. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO | 4 |
| 2.1. DEFINICIÓN MÁQUINA ELÉCTRICA | 4 |
| 2.2. CONSTITUCIÓN DE UNA MÁQUINA ELÉCTRICA ROTATIVA GENÉRICA | 4 |
| 2.2.1. LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN Y SU PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO..... | 6 |
| 2.2.2. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR ASÍNCRONO ALIMENTADO POR CONVERTIDORES DE FRECUENCIA..... | 9 |
| 2.3. TIPOS DE FRENADO | 13 |
| 2.3.1. FRENADO MEDIANTE ZAPATAS..... | 14 |
| 2.3.2. FRENADO MEDIANTE DISCOS | 15 |
| 2.3.3. FRENADO POR CORRIENTES DE FOUCAULT O DE PATÍN ELECTROMAGNÉTICO..... | 17 |
| 2.3.4. frenado reostático..... | 19 |
| 2.3.5. Frenado regenerativo | 20 |
| 3. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE LA SUBESTACIÓN | 23 |
| 3.1. DISPOSICIONES LEGALES..... | 23 |
| 3.2. LA ELECTRIFICACIÓN FERROVIARIA | 23 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3. SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN | 24 |
| 3.4. CATENARIA | 24 |
| 3.4.1. Hilo de contacto..... | 25 |
| 3.4.2. Montajes del hilo de contacto | 26 |
| 3.4.3. Catenaria rígida | 31 |
| 3.4.4. Tercer carril | 31 |
| 3.4.5. Otros sistemas de captación..... | 33 |
| 3.5. SUBESTACIONES DE TRACCIÓN | 34 |
| 3.5.2. Subestaciones de corriente continua..... | 35 |
| 3.5.3. Subestaciones de corriente alterna | 37 |
| 4. POSIBLES SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA | 38 |
| 4.1.1. Soluciones tecnológicas destinadas a reducir el consumo energético y optimizar la tensión de suministro de tracción. | 39 |
| 4.1.2. Requerimientos de los sistemas acumuladores de energía..... | 39 |
| 4.1.3. Sistemas de acumulación por baterías..... | 40 |
| 4.1.4. Sistemas de acumuladores inerciales de energía | 40 |
| 4.1.5. Acumuladores de energía mediante bobinas superconductoras | 41 |
| 4.1.6. Acumuladores de energía con condensador de doble estrato | 42 |
| 4.1.7. Acumuladores de energía con supercondensadores | 43 |
| 4.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS ACUMULADORES DE ENERGÍA ... | 45 |
| 4.2.1. Ventajas: | 45 |
| 4.2.2. Inconvenientes: | 46 |
| 4.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACUMULADORES DE ENERGÍA..... | 46 |
| 4.3.1. Dinámica del sistema acumulador | 46 |
| 4.3.1. Dimensionado del sistema acumulador | 47 |
| 4.4. PRINCIPIO DE SOPORTE DE LA TENSIÓN EN LA CATENARIA | 47 |
| 5. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE FRENADO REGENERATIVO . | 48 |
| 5.2. POSIBLES SISTEMAS DE UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA RECUPERADA | 48 |
| 5.3. ACUMULADROES EMBARCADOS..... | 49 |
| 5.4. ACUMULADORES EN TIERRA | 51 |
| 5.4.2. Subestaciones de corriente alterna | 52 |
| 5.4.3. Subestación de corriente continua | 52 |

| | |
|--|-----------|
| 6. CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE FRENADO REGENERATIVO | 55 |
| 6.1. ELECCIÓN DE LA ESTACIÓN MÁS FAVORABLE | 55 |
| 6.2. CÁLCULO GENERAL DE LA ENERGÍA DE UN TREN..... | 61 |
| 6.2.1. Ecuación del movimiento del tren | 61 |
| 6.2.2. Potencia y fuerza | 64 |
| 6.2.3. Curva de Resistencia al avance del vehículo. | 65 |
| 6.2.4. Representación gráfica de los esfuerzos de tracción, freno y resistencias. | 66 |
| 6.3. CÁLCULO DE LA ENERGÍA REGENERADA POR EL TREN DE CERCANÍAS CIVIA | 67 |
| 6.3.2. Condiciones reales de explotación. | 68 |
| 6.3.3. Curvas de esfuerzos tracción y freno..... | 69 |
| 6.3.4. Curvas de resistencia al avance | 73 |
| 6.3.5. Cálculo de la energía por cada tipo de tren según la pendiente y la masa | 77 |
| 6.4. ESTACIONES DE RECARGA PARA VE | 91 |
| 6.5. INFRAESTRUCTURA DE RECARGA..... | 92 |
| 7. PRESUPUESTO | 94 |
| 8. CONCLUSIONES..... | 95 |
| 9. BIBLIOGRAFIA..... | 96 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1. Constitución de la máquina eléctrica rotativa | 5 |
| Figura 2.2. Representación esquemática de una máquina de inducción. | 7 |
| Figura 2.3. Interacción entre campo e intensidades en un motor de inducción | 8 |
| Figura 2.4. Representación par-velocidad | 10 |
| Figura 2.5. Ondulador de semiconductores | 12 |
| Figura 2.6. Modulación por ancho de pulso | 13 |
| Figura 2.7. Frenado mediante zapatas | 15 |
| Figura 2.8. Frenado de discos | 16 |
| Figura 2.9. Timonería de accionamiento hidráulico/neumático | 17 |
| Figura 2.10. Frenado mediante corrientes de Foucault | 18 |
| Figura 2.11. Efecto de Foucault..... | 19 |
| Figura 2.12. Esquema eléctrico de frenado reostático | 20 |
| Figura 2.13. Esquema representativo del frenado regenerativo..... | 21 |
| Figura 2.14. Tipos de Freno | 22 |
| Figura 3.1. Esquema básico de electrificación ferroviaria. | 24 |
| Figura 3.2. Distintas formas de los hilos de contacto..... | 26 |
| Figura 3.3. Montajes de hilos de contacto | 27 |
| Figura 3.4. Distintos elementos de la catenaria convencional | 28 |
| Figura 3.5. Representación simplificada de catenaria convencional | 29 |
| Figura 3.6. Distintos elementos de catenaria tranviaria | 29 |
| Figura 3.7. Representación simplificada de catenaria tranviaria | 30 |
| Figura 3.8. Elementos de unión entre las distintas subestaciones..... | 30 |
| Figura 3.9. Tercer carril | 32 |
| Figura 3.10. Subestación | 34 |
| Figura 3.11. Esquema de Subestación de Corriente Continua..... | 36 |
| Figura 3.12. Rectificador..... | 36 |
| Figura 4.1. Condensador de doble estrato | 42 |
| Figura 4.2. Conexionado de un condensador a la línea de 750 Vcc | 43 |
| Figura 4.3. Esquema de la acumulación de energía | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.2. Tranvía con acumuladores embarcados..... | 50 |
| Figura 5.3. Esquema básico de ultracondensadores en un tren..... | 50 |
| Figura 5.4. Esquema eléctrico de conexión de ultracondensadores. | 51 |
| Figura 5.5. Localización de los sistemas de SC embarcados | 51 |
| Figura 5.6. Proceso de devolución de energía eléctrica a la red. | 52 |
| Figura 5.7. Esquema Subestación de Corriente Continua con Inversor | 53 |
| Figura 6.1. Consumo energético de diferentes líneas de cercanías de Madrid | 56 |
| Figura 6.2. Ubicación Estación La Serna | 60 |
| Figura 6.3. Estación La Serna..... | 60 |
| Figura 6.4. Ejemplo curva de tracción-velocidad | 65 |
| Figura 6.5. Curva esfuerzo-velocidad | 67 |
| Figura 6.6. Subestaciones de la línea de cercanías | 68 |
| Figura 6.7. Tren de cercanías CIVIA | 69 |
| Figura 6.8. Distancia y alturas de las estaciones de cercanías Leganés- Parque Polvoranca | 71 |
| Figura 6.9. Distancia y alturas de las estaciones de cercanías. La Serna- Parque Polvoranca | 72 |
| Figura 6.10. Distancia y alturas Parque Polvoranca-La Serna..... | 72 |
| Figura 6.11. Distancia y alturas Fuenlabrada-La Serna | 73 |
| Figura 6.12. Curvas de resistencia al avance, curvas de freno y de tracción..... | 74 |
| Figura 6.13. Curva de frenado | 74 |
| Figura 6.14. Curvas de resistencia al avance | 75 |
| Figura 6.15. Curva de frenado y curva de resistencia al avance | 76 |
| Figura 6.16. Datos Parque Polvoranca 2coches 2% | 78 |
| Figura 6.17. Datos Parque Polvoranca 3 coches 2% | 79 |
| Figura 6.18. Datos Parque Polvoranca 4 coches 2% | 79 |
| Figura 6.19. Datos Parque Polvoranca 5 coches 2% | 80 |
| Figura 6.20. Datos Parque Polvoranca 2 coches -1% | 81 |
| Figura 6.21. Datos Parque Polvoranca 3 coches -1% | 82 |
| Figura 6.22. Datos Parque Polvoranca 4 coches -1% | 82 |
| Figura 6.23. Datos Parque Polvoranca 5 coches -1% | 83 |
| Figura 6.24. Estación La Serna 2 coches. 0%..... | 83 |
| Figura 6.25. Estación La Serna 3 coches. 0%..... | 84 |
| Figura 6.26. Estación La Serna 4 coches. 0%..... | 85 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.27. Estación La Serna 5 coches. 0%..... | 86 |
| Figura 6.28. Estación La Serna 2 coches. 1%..... | 86 |
| Figura 6.29. Estación La Serna 3 coches. 1%..... | 87 |
| Figura 6.30. Estación La Serna 4 coches. 1%..... | 88 |
| Figura 6.31. Estación La Serna 5 coches. 1%..... | 88 |
| Figura 6.32. Stationary Energy Store (SES)..... | 90 |
| Figura 6.33. Ejemplo punto de recarga gestionado por un Gestor (Adif) | 93 |

INDICE DE TABLAS

| | | |
|--------------------|---|----|
| Tabla 2.1. | Categorías máquinas eléctricas..... | 4 |
| Tabla 2.2. | Características y localización de los elementos para los distintos tipos de motores ... | 6 |
| Tabla 2.3. | Forma de onda salida del ondulator | 11 |
| Tabla 5.1. | Comparación consumo energético de distintos medios de transporte..... | 48 |
| Tabla 6.1. | Consumo específico del TREN, por número de viajeros (kwh/km) | 56 |
| Tabla 6.2. | Consumo específico del TREN, por número de viajeros (kwh/km) | 57 |
| Tabla 6.3. | Energía de la línea MÓSTOLES-FUENLABRADA..... | 58 |
| Tabla 6.4. | Energía de la línea Fuenlabrada-Móstoles | 59 |
| Tabla 6.5. | Energía de las estaciones de la línea Móstoles-Fuenlabrada y Fuenlabrada-Móstoles | 59 |
| Tabla 6.6. | Resumen de fuerzas longitudinales que actúan sobre el tren. | 63 |
| Tabla 6.7. | Datos técnicos de las configuraciones del CIVIA | 69 |
| Tabla 6.8. | Tipo de trenes que circulan por la línea C5 de cercanías diariamente | 70 |
| Tabla 6.9. | Datos del fabricante de la ecuación de la resistencia al avance del CIVIA..... | 75 |
| Tabla 6.10. | Datos Parque Polvoranca 2coches 2% | 77 |
| Tabla 6.11. | Datos Parque Polvoranca 3 coches 2% | 78 |
| Tabla 6.12. | Datos Parque Polvoranca 4 coches 2% | 79 |
| Tabla 6.13. | Datos Parque Polvoranca 5 coches 2% | 80 |
| Tabla 6.14. | Datos Parque Polvoranca 2 coches -1% | 80 |
| Tabla 6.15. | Datos Parque Polvoranca 3 coches -1% | 81 |
| Tabla 6.16. | Datos Parque Polvoranca 4 coches -1% | 82 |
| Tabla 6.17. | Datos Parque Polvoranca 5 coches -1% | 82 |
| Tabla 6.18. | Estación La Serna 2 coches. 0% | 83 |
| Tabla 6.19. | Estación La Serna 3 coches. 0% | 84 |
| Tabla 6.20. | Estación La Serna 4 coches. 0% | 84 |
| Tabla 6.21. | Estación La Serna 5 coches. 0% | 85 |
| Tabla 6.22. | Estación La Serna 2 coches. 1% | 86 |
| Tabla 6.23. | Estación La Serna 3 coches. 1% | 86 |
| Tabla 6.24. | Estación La Serna 4 coches. 1% | 87 |

Tabla 6.25. Estación La Serna 5 coches. 1%88

Tabla 6.26. Cálculo de la energía por cada día89



1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIONES

En un principio, el objeto del proyecto iba a estar dedicado al impulso del vehículo eléctrico, debido a la importancia de fomentar alternativas a la dependencia del petróleo. Puesto que realicé prácticas en el departamento eléctrico ferroviario de la empresa INECO, decidí realizar el proyecto con ellos, de este modo surgió la idea de mezclar la idea principal, fomentar el vehículo eléctrico, y la experiencia e información que la empresa podía aportarme. Entonces surgió la idea de estudiar las posibilidades de una ferrolinera. Puesto que el proyecto se ha realizado con la supervisión tanto del tutor de la empresa como de la universidad, el enfoque final ha sido el estudio del aprovechamiento de la energía de frenado de los trenes.

1.2. OBJETIVOS

Estudio de las estaciones de cercanías de Madrid más favorables para la incorporación de un sistema apropiado para la generación de energía del freno regenerativo de los trenes.

Cálculo de la energía regenerada por cada tren en dicha estación.

Estudio de los posibles métodos de aprovechamiento de dicha energía.

Estudio técnico del método más adecuado elegido de almacenamiento de dicha energía.

Posibles usos de la energía regenerada.

1.3. FASES DEL PROYECTO

El proyecto ha tenido varias fases. En un principio se recopiló información sobre carga de vehículos Eléctricos, puesto que en un principio iba a estar más enfocado al uso de la energía eléctrica para alimentar puntos de carga y así fomentar la incorporación del vehículo eléctrico en España. Además, se recopiló información sobre el freno regenerativo, la gran mayoría documentos proporcionados por la empresa INECO.



En la siguiente fase, aprovechando que una parte de mi trabajo consistía en estudiar el consumo total de los trenes, consistió en el desarrollo de una herramienta de cálculo de la energía del frenado regenerativo de un tren a partir de sus características constructivas.

La última fase del proyecto consistió en validar la herramienta diseñada, para lo cual se hizo un estudio de viabilidad para escoger cuáles estaciones de cercanías de Madrid serían las adecuadas para aprovechar la energía de frenado de sus trenes. Finalmente se determinó que un sistema basado en ultracondensadores era la mejor opción para aprovechar la energía de frenado regenerativo de las estaciones estudiadas.

1.4. ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

El presente proyecto está formado por ocho capítulos, el primer capítulo formará la introducción y los objetivos generales del proyecto.

Capítulo 2. ANÁLISIS REGENERACIÓN DE ENERGÍA. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Para entender el sistema de regeneración de energía de los trenes es preciso hacer una introducción del principio de funcionamiento de la máquina eléctrica. Por esta razón, en este capítulo se presentan los principios de funcionamiento de la máquina de inducción asíncrona, usada por los trenes de cercanías CIVIA. Además, se explican los diferentes sistemas de frenado de los trenes.

Capítulo 3. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE LA SUBESTACIÓN

Marco técnico y legal de los sistemas capaces de verter energía a la red pública. Descripción de los tipos de catenarias y subestaciones.

Capítulo 4. POSIBLES SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Descripción de los posibles métodos de almacenamiento de la energía. Motivos, ventajas y desventajas de los sistemas de almacenamiento mediante Ultracondensadores.

Capítulo 5. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE FRENADO REGENERATIVO

Posibles sistemas de utilización de la energía regenerada. Descripción de los acumuladores embarcados y acumuladores en tierra.

Capítulo 6. CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE FRENADO REGENERATIVO



Elección de las estaciones más favorables de la red de cercanías de Madrid para la instalación de acumuladores en tierra según la frecuencia de trenes y pendiente.

Programación en Excel para el cálculo estimado de la energía regenerada por los trenes según las características del tren y de la vía.

Estudio de la subestación seleccionada y ofrecimiento de una posible opción de almacenamiento de esta energía regenerada mediante Ultracondensadores, incluyendo descripción del proyecto, cálculos técnicos y presupuesto.

Capítulo 7. PRESUPUESTO

Descripción, unidad, medición, precio unitario y precio total.

Capítulo 8. CONCLUSION

Se presentan las conclusiones del proyecto.



2. ANÁLISIS REGENERACIÓN DE ENERGÍA. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los trenes de cercanías de CAF, usan una máquina asíncrona, una de las características de esta máquina es que puede ser usada como motor, cuando el tren necesita traccionar, o como generador, cuando el tren está frenando.

2.1. DEFINICIÓN MÁQUINA ELÉCTRICA

Se entiende por máquina eléctrica todo aquel dispositivo capaz de transformar, en energía eléctrica, otra forma cualquiera de energía, o bien, al revés, transformar en otra forma de energía la energía eléctrica. De acuerdo con esto, se pueden clasificar las máquinas eléctricas en tres categorías que se muestran en la tabla 2.1.

| Máquina | Función |
|-------------|--|
| Generador | Transforma cualquier forma de energía en energía eléctrica |
| Receptor | Transforma energía eléctrica en otra forma de energía si ésta es mecánica, se denomina motor. |
| Convertidor | Transforma energía eléctrica, con unas determinadas características en energía eléctrica de otras características. |

Tabla 2.1. Categorías máquinas eléctricas

2.2. CONSTITUCIÓN DE UNA MÁQUINA ELÉCTRICA ROTATIVA GENÉRICA

Desde el punto de vista mecánico y, relativo a la figura 2.1, se pueden distinguir, en la máquina, dos partes principales:

- Parte fija o estator.
- Parte móvil o rotor. (Por lo general, girará en el interior del estator).

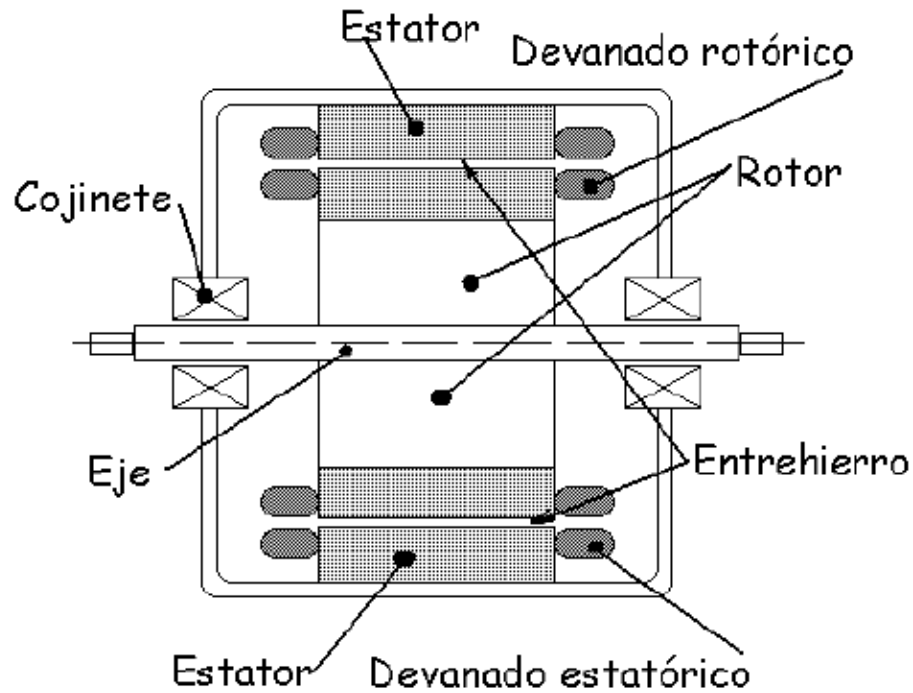


Figura 2.1. Constitución de la máquina eléctrica rotativa

Cada una de las partes abarca un núcleo toroidal cilíndrico de chapa magnética o fundición, cuyas superficies enfrentadas pueden ser casi continuas, con pequeñas ranuras repartidas uniformemente sobre su periferia (rotor o estator liso) o con amplias muescas, formando un conjunto de polos salientes. El pequeño intervalo de aire que queda entre ambas partes recibe el nombre de entrehierro.

Desde el punto de vista electromagnético, se encuentra siempre un circuito magnético, formado por los núcleos y el entrehierro y dos circuitos eléctricos.

Uno de estos dos circuitos eléctricos recibe el nombre de inductor, circuito de excitación o, simplemente, excitación y su función es producir el campo magnético de acoplamiento.

El otro circuito eléctrico, el inducido, es aquél donde se producen las fuerzas electromotrices, o sea, tensiones, que se recogen en el exterior de la máquina, como origen de la energía eléctrica cedida por la misma en su funcionamiento como generador o bien fuerzas contraelectromotrices, que se oponen a la tensión de alimentación en su funcionamiento como motor.

Asimismo, este circuito constituye el origen de un par motor, si la máquina opera de este modo o un par resistente, si la máquina opera como generador.



A continuación en la tabla 2.2, se recogen las características y localización de los elementos más importantes:

| <i>MAQUINAS</i> | | | | |
|------------------------------------|--|--|---|---|
| | <i>De corriente continua</i> | <i>De corriente alterna</i> | | |
| | | <i>Excitadas por cc</i> | <i>Excitadas por ca</i> | |
| | | <i>Síncronas</i> | <i>Asíncronas</i> | <i>De colector</i> |
| <i>Devanado inductor</i> | En el estator | En el rotor | (Llamado primario) en el estator | En el estator |
| <i>Devanado inducido</i> | En el rotor | En el estator | (Llamado secundario) en el rotor | En el rotor (de ejecución idéntica a las de cc) |
| <i>Existe corriente continua</i> | En los devanados del estator y a la entrada y salida del rotor | En el devanado inductor (rotor) | En ningún sitio | En ningún sitio |
| <i>Existe corriente alterna</i> | En los devanados del rotor | En el devanado inducido (estator) | En los dos devanados | En los dos devanados |
| <i>Velocidad de giro</i> | Regulable entre amplios límites | Rígidamente constante (velocidad de <i>sincronismo</i>) | Casi constante, muy cerca de la de <i>sincronismo</i> | Regulable entre amplios límites |
| <i>Escobillas</i> | Sí, sobre el inducido (rotor) | (A veces), sobre el inductor (estator) | No | Sí, sobre el inducido |
| <i>Aplicaciones más frecuentes</i> | Motor y generador | Generador | Motor | Motor |
| <i>Aplicación ferroviaria</i> | Motor de tracción y generador de frenado | Generador principal | Motor de tracción y generador de frenado | Motores de barrera (PaN) |

Tabla 2.2. Características y localización de los elementos para los distintos tipos de motores

2.2.1. LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN Y SU PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

La máquina de inducción está compuesta como se puede observar en la Figura 2.2 por las siguientes partes: Corona estática, entrehierro, devanado estático, corona rotórica, barras de la jaula del rotor y las ranuras del rotor.

La corona estática está compuesta por chapas magnéticas de espesor variable entre 0.35 a 0.5 mm, aisladas entre sí por barnices, ranurada interiormente y convenientemente prensadas y sujetas a una carcasa de fundición de hierro o a un marco de acero soldado. Esta corona recibe el nombre de estator.

El devanado estático es polifásico de conductores, distribuido y alojado en el ranurado del estator y que constituye el devanado estático.

La corona rotórica también está formada por chapas magnéticas, apiladas, generalmente sobre una linterna de acero, soldada al eje de giro y ranurada asimismo. Esta otra corona, ligada al eje de rotación, recibe el nombre de rotor.

Otro devanado polifásico, dispuesto sobre las ranuras del rotor y que constituye el devanado rotórico.

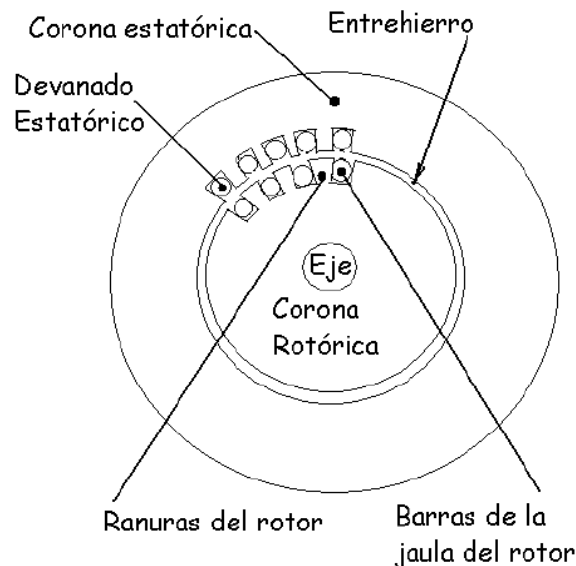


Figura 2.2. Representación esquemática de una máquina de inducción.

El último devanado puede ser similar al del estator, con unos terminales, conectados a unos anillos colectores y aislados del eje, o bien, como se muestra la Figura 2.2, unas simples barras de cobre, bronce o aluminio, unidas por sus extremos a unos aros, del mismo metal, que los ponen en cortocircuito.

En el primer caso, la máquina se corresponde con el tipo de las de rotor bobinado y, en el segundo, con las de rotor en cortocircuito, llamadas también de jaula.

La máquina de corriente alterna asíncrona o máquina de inducción puede ser asimilada a un transformador, en el que el arrollamiento primario suele ser el estator y el arrollamiento secundario, el rotor. La energía del primario es transferida al secundario y gran parte de ella se convierte en mecánica, en el eje de giro.

Si el devanado estático está distribuido regularmente, formando un arrollamiento trifásico simétrico y cada una de las fases ha sido bobinada, formando un número de polos $2p$, al alimentar este devanado con un sistema trifásico equilibrado de corrientes, de frecuencia f_1 , obtendremos un campo magnético giratorio que se desplaza a lo largo del

entrehierro, a una velocidad angular, denominada velocidad de sincronismo y que se calcula mediante la ecuación (2.1).

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} \quad (2.1)$$

Este campo magnético, durante su marcha, atraviesa, sucesivamente, el estator, el entrehierro y el rotor, cerrándose nuevamente a través del estator.

En el rotor, las barras, si son del tipo de jaula o los conductores si son del tipo de rotor bobinado, son atravesados por dicho campo y por su naturaleza variable con el tiempo, engendra sobre ellos una fuerza electromotriz.

Al encontrar dichas fuerzas electromotrices los conductores formando un circuito cerrado dan lugar a la aparición de unas intensidades. Estas intensidades de frecuencia f_2 generan fuerzas magnetomotrices de reacción en el rotor, las cuales a su vez dan origen a un par electromagnético que hace girar al rotor a una velocidad w inferior a la de sincronismo.

Si la persecución del campo magnético giratorio del estator por parte del rotor se resuelve con la alineación de éste con aquél y se igualan sus velocidades, entonces dejan de inducirse las f.e.m. y al no aparecer corriente alguna tampoco tienen lugar las f.m.m. de reacción y con ello el par se hace nulo.

Mientras exista una diferencia entre la velocidad del campo inductor (síncrona) y la del rotor, es decir, mientras haya un deslizamiento de velocidades el par electromagnético de la máquina podrá accionar un par resistente.

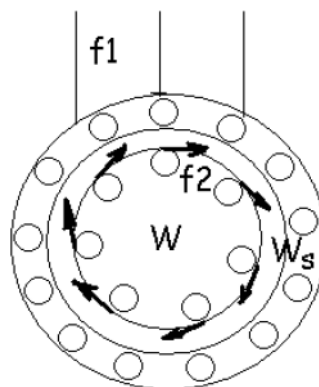


Figura 2.3. Interacción entre campo e intensidades en un motor de inducción



La diferencia de velocidades es pequeña, lo que hace que las intensidades del rotor no sean muy elevadas y casi toda la transferencia de energía desde el estator al rotor, sea de índole mecánica.

La máquina así constituida es extraordinariamente simple y puede denominarse de dos maneras:

- Máquina de inducción: Puesto que las corrientes del rotor son inducidas, a diferencia del resto de las máquinas, donde las corrientes del rotor y del estator son conducidas, suministradas desde una fuente exterior.
- Máquina asíncrona: Ya que la velocidad del rotor no está en sincronismo con la onda de fuerza magnetomotriz del estator.

Por otro lado, de la ecuación de velocidad de un motor asíncrono ecuación (2.2), se derivan tres métodos de control, para la misma:

$$\omega \cdot p = 2 \cdot \pi \cdot f_1 (1 - s) \quad (2.2)$$

Por variación del número de pares de polos.

Por variación del deslizamiento.

Por variación de la frecuencia de alimentación.

El primero de los métodos ha sido muy utilizado, pero para aplicaciones que requieran pocos escalones de velocidad. El segundo, variando la tensión de alimentación, es poco eficiente. El tercero, sin uso, antes del desarrollo de los actuales variadores electrónicos de potencia es actualmente el método más empleado.

2.2.2. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR ASÍNCRONO ALIMENTADO POR CONVERTIDORES DE FRECUENCIA.

El modelado del motor tipo jaula, es más complicado debido a que solamente hay acceso al motor desde el estator. De manera que se utilizará el método de variación de la velocidad de giro variando la frecuencia de las corrientes de alimentación del estator.

Teniendo en cuenta la ecuación del par, observamos que un descenso del flujo da lugar una reducción del par:

$$T = k \cdot \phi \cdot i_R \quad (2.3)$$

Por lo tanto, el aprovechamiento máximo del motor asíncrono implica controlarlo, de modo que el flujo se aproxime lo más posible al nominal, es decir, aquél para el cual la máquina ha sido diseñada y construida.

La característica mecánica (par-velocidad) de un motor que responda a lo dicho anteriormente (flujo constante e igual al nominal) es similar a la Figura 2.4.

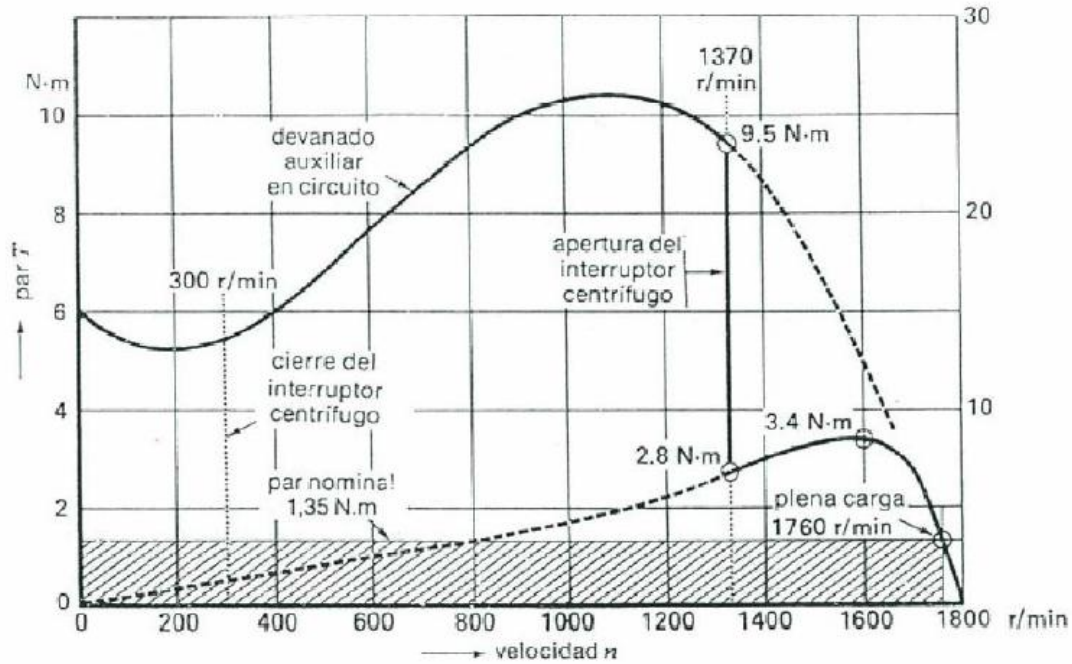


Figura 2.4. Representación par-velocidad

La primera manera de lograr, de forma aproximada, que el flujo no varíe es hacer que la tensión de alimentación y la frecuencia varíen proporcionalmente. Sin embargo, a medida que las frecuencias van bajando, en realidad los flujos disminuyen también.

Esta variación en la frecuencia de alimentación se debe a la acción del convertidor de frecuencia o ondulator que, partiendo de una red de corriente continua, proporciona corriente en alterna, con frecuencia ajustable. El ondulator modifica la corriente continua, que toma de la red de alimentación, en magnitudes regulables de alterna para el motor. La forma de onda de la tensión, a la salida del ondulator puede ser de las dos formas que se muestra en la Tabla 2.3:

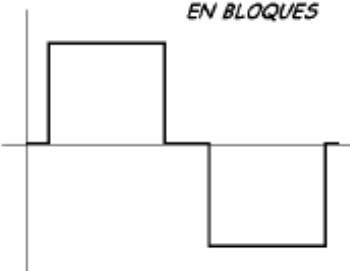
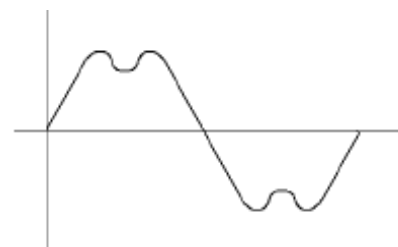
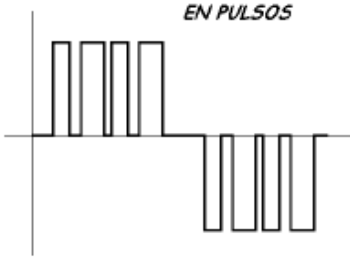
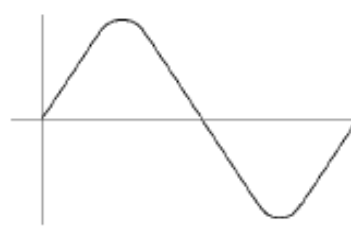
| | |
|---|--|
| <p style="text-align: center;">EN BLOQUES</p>  <p>Cada alternancia de la tensión está formada por bloques, de duración temporal dada. La frecuencia de estos bloques proporciona la frecuencia de salida y la tensión de salida se regula mediante la magnitud de la tensión en el circuito intermedio. La regulación de la tensión puede hacerse:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Mediante rectificador controlado de entrada. -Mediante rectificador no controlado más chopper en el circuito intermedio.  <p>La intensidad absorbida se aleja mucho de la forma senoidal ya que presenta armónicos, lo que se traduce en ruidos, vibraciones, par motor con componentes pulsatorios y pérdidas de potencia por calentamiento.</p> | <p style="text-align: center;">EN PULSOS</p>  <p>La tensión de salida se regula variando el ancho de pulso. La tensión del circuito intermedio puede ser fija. El sistema de control debe efectuar conmutaciones más frecuentes por cada semionda. Ello implica tiristores con dispositivos de apagado o semiconductores de conmutación sencilla como el GTO, el MOSFET o el IGBT.</p>  <p>La intensidad absorbida tiene formas de onda prácticamente senoidales.</p> |
|---|--|

Tabla 2.3. Forma de onda salida del ondulator

En la Figura 2.5, se muestra la disposición general de un ondulator de semiconductores que no precisan de dispositivos secundarios de bloqueo:

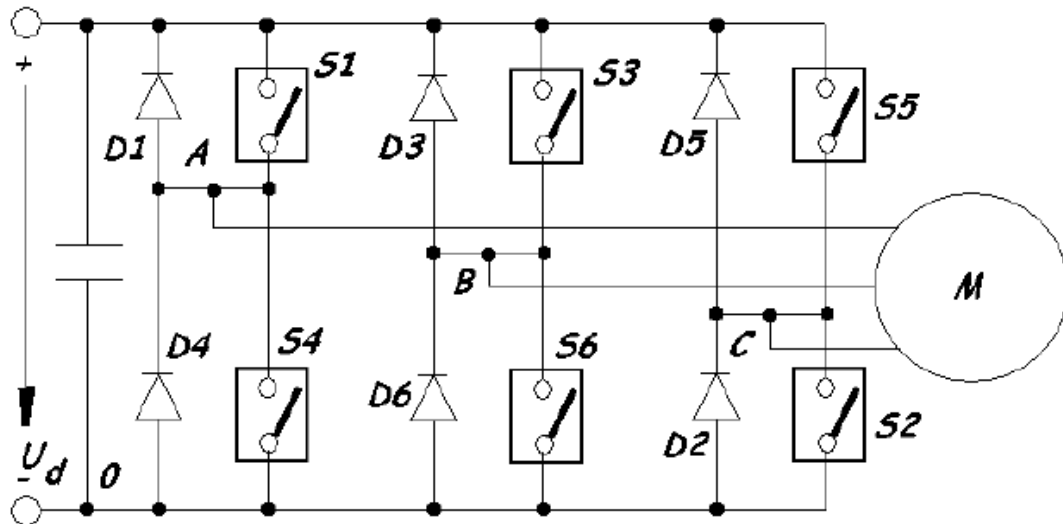


Figura 2.5. Ondulador de semiconductores

El semiconductor trabajará alternativamente en conducción o en bloqueo y está representado mediante un interruptor. Los diodos en anti paralelo con los semiconductores, tienen por objetivo conducir la intensidad en los instantes temporales en que sea opuesta a las tensiones, ya que el motor es una carga inductiva par el ondulador. La tensión U_d es la de la red de alimentación. El valor de las tensiones, a la salida del inversor puede modificarse de las siguientes maneras:

Modificando el valor de la tensión del circuito intermedio U_d , con un rectificador controlado de entrada.

Modificando el ancho de conducción de la tensión de salida, retrasando y adelantando la conducción y el bloqueo de los semiconductores, respecto a sus pasos por 0° y 180° .
Figura 2.6

Cualquiera de las opciones nombradas se corresponde con la técnica de salida por bloques. Asimismo, cualquier de las estrategias anteriores origina una generación de armónicos indeseable, así como una importante pérdida de potencia, por lo que tendremos que tener en consideración la técnica de salida por pulsos basada en:

La conmutación de los semiconductores del ondulador varias veces por cada ciclo de la frecuencia fundamental, de forma que la proporción entre los tiempos de encendido t_{on} y de apagado t_{off} proporcione el valor medio de la tensión de salida, mediante la relación

$$t_{ON} / (t_{ON} + t_{OFF}) \quad (2.4)$$

Este último caso se corresponde con la técnica de salida por pulsos.

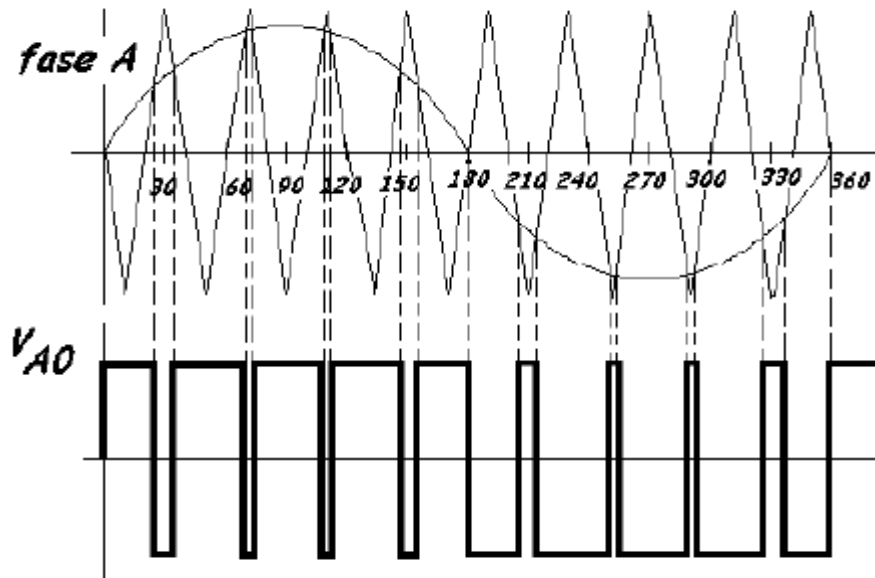


Figura 2.6. Modulación por ancho de pulso

Esta técnica se conoce con el nombre de PWM (Pulse Width Modulation) o modulación por ancho de pulso y permite:

Dentro de esta técnica puede emplearse, asimismo una de las siguientes variantes:

- PWM senoidal.
- PWM con cancelación selectiva de armónicos.

En la Figura 2.6, se representa el principio de la técnica senoidal. Esta técnica consiste en modular un tren de impulsos triangulares con una onda senoidal. Ambas señales se cortan en unos puntos que definen los instantes de tiempo en los que se disparará a los semiconductores del ondulator.

Si no se pueden utilizar semiconductores de alta cadencia de encendido, puede emplearse la cancelación selectiva de armónicos, la cual consiste en establecer anchuras variables de pulsos, modulados en forma no senoidal y que persigue eliminar determinados armónicos que influyen negativamente sobre la forma final de las ondas de tensión que alimentarán al motor.

2.3. TIPOS DE FRENADO

El sistema de los trenes incorporan un primer freno eléctrico para conseguir que el motor en el momento de freno actúe como generador, bien devolviendo la energía a la red o bien mediante el consumo de esa energía sobre resistencias que disipen el 100% de la



energía en forma de calor. El sistema de frenado mecánico de los bogies puede ser de cinco tipos para ferrocarriles metropolitanos, tranvías o metros ligeros.

- Frenado mediante zapatas. Figura 2.7
- Frenado mediante discos. Figura 2.8
- Frenado por corrientes de Foucault o de patín electromagnético. Figura 2.10
- Frenado reostático. Figura 2.12
- Frenado regenerativo. Figura 2.13

2.3.1. FRENADO MEDIANTE ZAPATAS

El sistema de frenado mediante zapatas se compondrá de un cilindro, que bien neumática o hidráulicamente, acciona un vástago que a su vez presiona la zapata sobre la rueda de modo que el frenado se efectúa mediante la aplicación de una presión entre la zapata y la banda de rodadura.

Las primeras zapatas de freno se realizaban en fundición gris, ya que estas zapatas eran eficaces ante condiciones atmosféricas desfavorables pero tenían como inconvenientes la contaminación producida por el polvo de hierro e inclusiones metálicas, los procesos de frenado eran ruidosos que unido a las chispas desprendidas durante los procesos de frenado provocaban un desgaste prematuro de las zapatas.

Esto da lugar al desarrollo de las zapatas utilizándose para su fabricación material sintético no férreo, evitando de este modo la mayor parte de los inconvenientes de las zapatas de fundición y alcanzando una mayor duración junto con una disminución de los problemas térmicos. Su principal ventaja es la aplicación de una mayor fuerza de rozamiento y prácticamente constante con la velocidad.

Cabe destacar la existencia de zapatas de madera, que debidamente tratadas e ignífugas pueden desempeñar el mismo trabajo que las zapatas de material sintético no férreo.

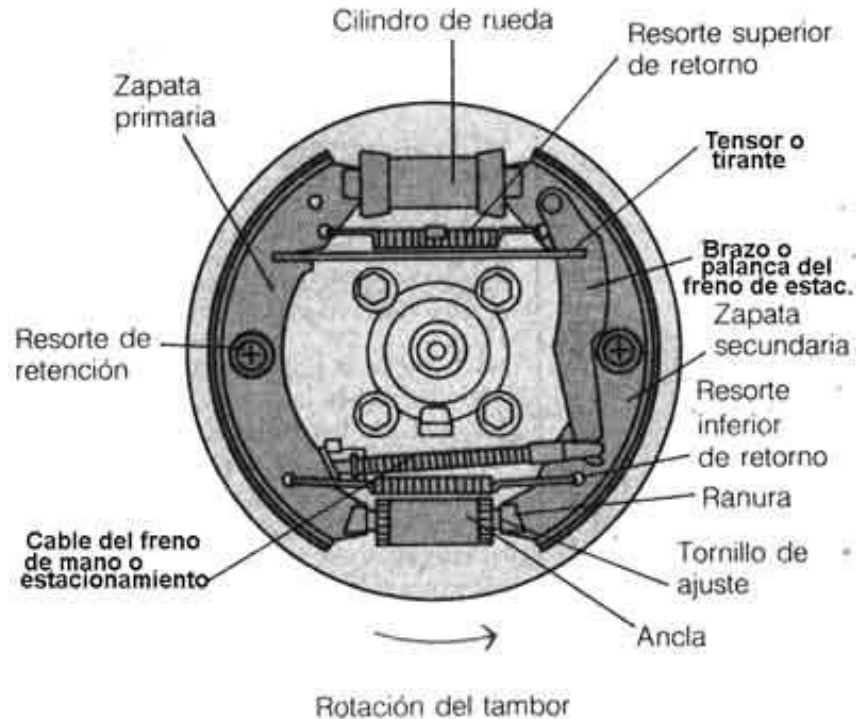


Figura 2.7. Frenado mediante zapatas

2.3.2. FRENADO MEDIANTE DISCOS

Los discos se encuentran calados sobre el propio eje y disponen de mordazas, portazapatas y pastillas de freno o también denominadas zapatas. Las zapatas presionan al disco accionados también por un cilindro neumático, hidráulico o con un resorte interno de muelle para casos de emergencia o freno de estacionamiento.

El origen del frenado mediante discos se encuentra en los tranvías de Berlín en 1924. Se dispone de varios tipos de frenado mediante discos, entre ellos destacamos los de simple pistón y los de doble pistón.

Los primeros discos se realizaron en acero, pero debido a su rápido desgaste y a la irregularidad de frenada del mismo, se desarrollaron discos de alta calidad con fundición gris perlítica y con fundición austenítica y grafitica, aunque la utilización de estos últimos es escasa. Las ventajas de la utilización de estos materiales es que implican un menor momento de inercia sobre el eje, el frenado es poco ruidoso, con un menor gasto de disco y disminuye los problemas técnicos con las zapatas puesto que la mayor parte de la disipación calorífica es llevada a cabo por los discos que incorporan sistemas de ventilación.

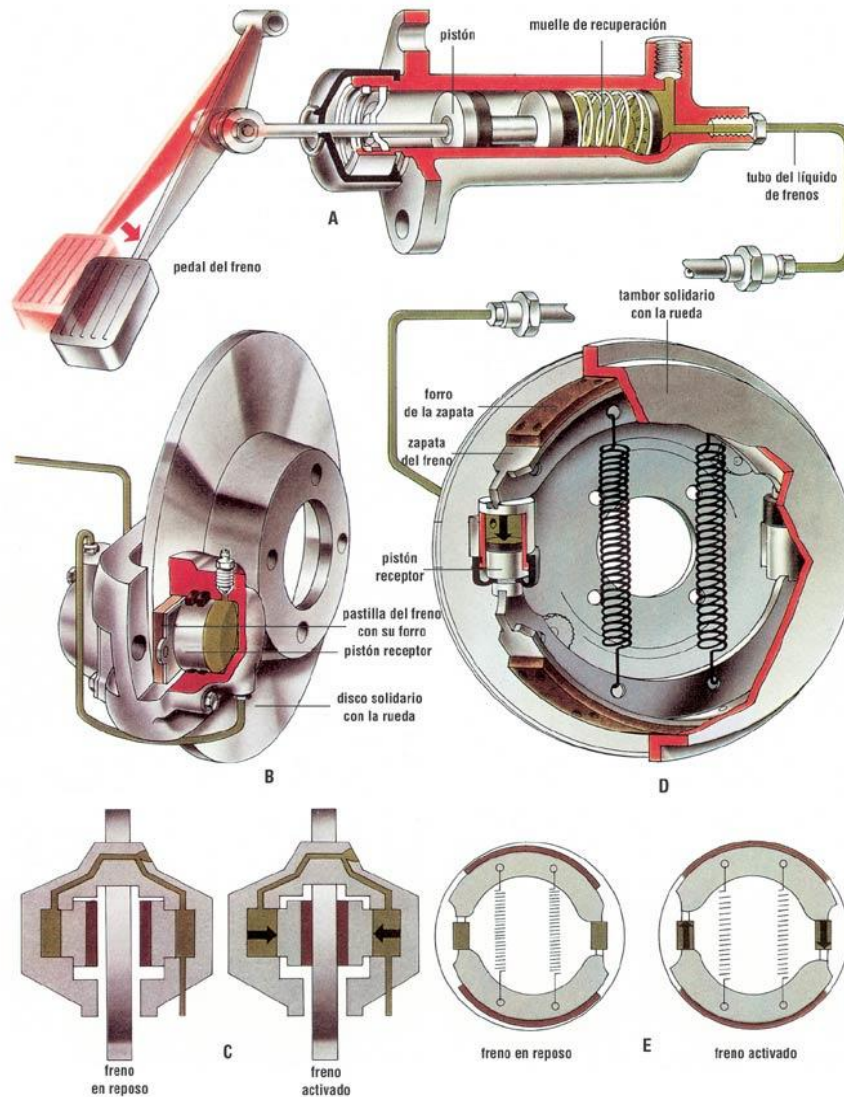


Figura 2.8. Frenado de discos

Tanto en el frenado mediante zapatas en rueda como en el frenado mediante pastillas de freno en discos, la acción neumática es promovida por el pistón de un cilindro que se amplifica mediante un juego de palancas y timonería. La mayoría de los frenos utilizados en los trenes utilizan sistemas de aire comprimido con presiones de funcionamiento entre 0 y 6 bares.

Los sistemas de mando han ido evolucionando a lo largo de los últimos años desde un mando regulado de forma totalmente manual hasta la situación actual mediante una petición eléctrica/electrónica del grado de freno que envía el conductor al sistema de A.T.O. (Operaciones Automáticas del Tren) desde la cabina de mando a todos los coches acoplados en la unidad del tren. Este sistema proporciona información sobre el nivel de carga de viajeros con el fin de aumentar o disminuir la presión de freno según el nivel de carga.

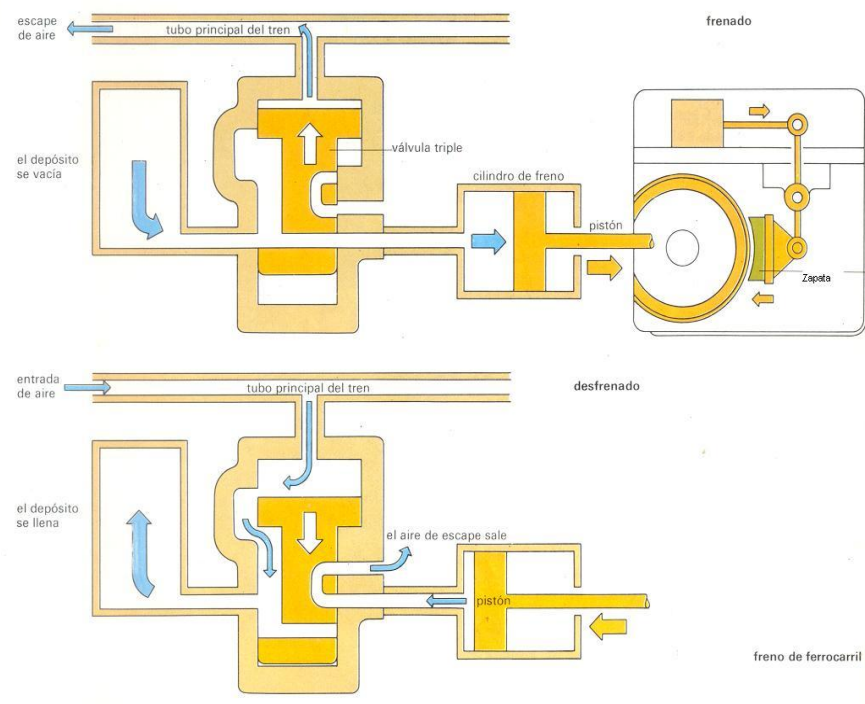


Figura 2.9. Timonería de accionamiento hidráulico/neumático

2.3.3. FRENADO POR CORRIENTES DE FOUCAULT O DE PATÍN ELECTROMAGNÉTICO

Este sistema es uno de los más utilizados en la actualidad tanto en los ferrocarriles metropolitanos, en los metros ligeros y sobre todo en los tranvías que circulan compartiendo el viario con automóviles.

El proceso consiste en realizar un frenado brusco del tren al dejar caer sobre los carriles unas bobinas inductoras, normalmente fijadas al bastidor de bogie, provocando un campo magnético que atravesando el cuerpo metálico de los carriles, hace que estos tiendan a adherirse mecánicamente a dicho patín electromecánico. Es decir, se genera un campo electromagnético que provoca fuerza de adherencia, como si de un imán frente a un cuerpo metálico se tratara y que provoca el frenado del tren.

Es preciso tener en cuenta que este sistema no suele tener regulación de intensidad de campo, por tanto provoca una deceleración siempre constante y normalmente elevada por ello su utilización suele limitarse a los frenados de emergencia.

El patín está construido con un material más blando que el carril, para evitar que la vía sea dañada. Una característica importante del freno electromagnético de patín es que la fricción es debido a la atracción magnética, de forma que su acción no descarga el peso del tren sobre la vía, y así el efecto de este freno se adiciona a los otros sistemas de frenado.

Esta característica se puede constatar en el hecho de que en algunos tranvías los patines del freno electromagnético se tambalean cuando no están activados al estar "colgando" del bastidor mediante cadenas.

El freno electromagnético de patín no debe confundirse con el freno lineal por corrientes de Foucault (Eddy linear current brake), en el cual no existe contacto mecánico, ni por lo tanto fricción entre el carril y el elemento del freno del vehículo. Este método de frenado también en forma de patín, y también contiene electroimanes.

En los tranvías el freno electromagnético de patín es obligatorio. Generalmente en los trenes, y a excepción de los tranvías, el freno electromagnético de patín se monta a varios centímetros del carril (mínimo de 5,5 cm) y se necesita de un dispositivo que los acerque al carril puesto que la posición de reposo es demasiado alta para que se cree un campo magnético eficaz, mientras que en los tranvías el freno se monta muy cerca del carril (0,8 a 1,2 cm) y por lo tanto no necesitan de un sistema que los acerque al carril para que el magnetismo pueda tener efecto.



Figura 2.10. Frenado mediante corrientes de Foucault

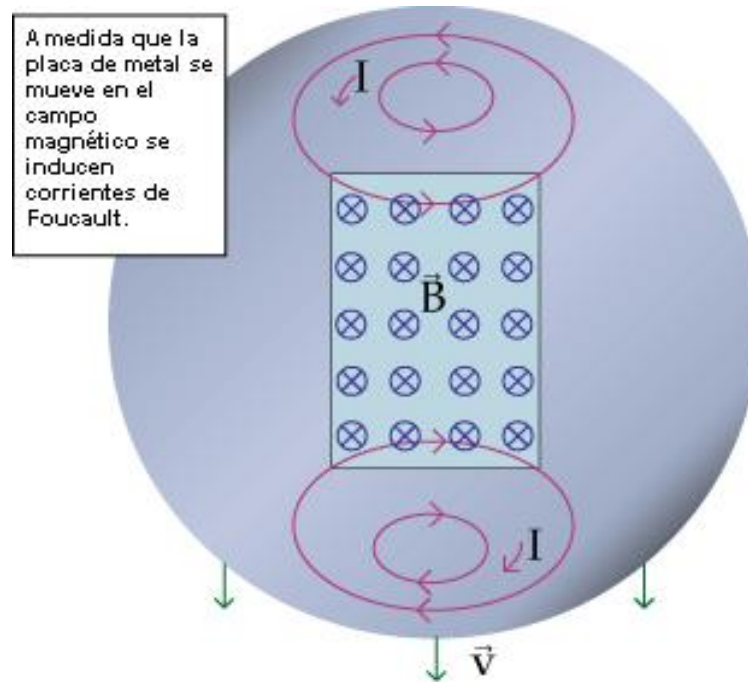


Figura 2.11. Efecto de Foucault

2.3.4. frenado reostático

El frenado reostático se trata de un tipo de frenado dinámico en el que la misión de las resistencias de frenado es la conversión de la energía cinética generada por el motor de tracción, en energía calorífica por el efecto Joule, para el caso de que la catenaria no sea receptiva y no se pueda devolver esta energía a la red para su aprovechamiento. También se activan en caso de sobre tensiones en el circuito intermedio del convertidor de tracción.

Estas resistencias poseen resistencia variable y un elevado tamaño que las permite una disipación efectiva de la energía calorífica, además de un aprovechamiento de dicha energía en ciertas estaciones del año, como en el invierno, donde las resistencias pueden funcionar como almacenadores de calor para el sistema de calefacción, pero a las que no se las puede dar otra aplicación en un ámbito diferente al del calentamiento.

Por otro lado, dicho sistema cuenta con unos choppers de frenado que son los encargados de habilitar y controlar la disipación de la energía cinética de la unidad en la fase de frenado.

Cada cofre de tracción incorpora dos circuitos de crowbar de protección contra sobrevoltajes, disponiendo de uno por cada Inversor Trifásico. Cada circuito de crowbar está constituido por un IGBT, un diodo y las resistencias de disipación externa.

Cada rama del chopper de frenado se conecta cada resistencia de frenado, lugar donde como ya se nombró anteriormente, se absorbe la energía cinética del tren y las sobretensiones generadas.

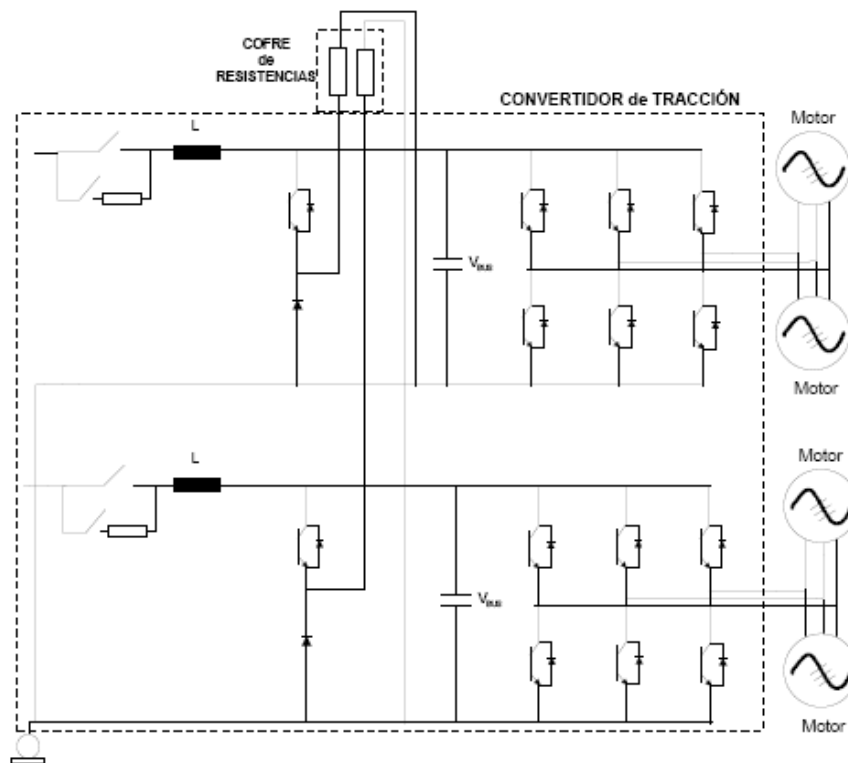


Figura 2.12. Esquema eléctrico de frenado reostático

2.3.5. Frenado regenerativo

El sistema de frenado regenerativo se basa en la transformación de la energía cinética, a partir de su inercia, en energía eléctrica para abastecer los sistemas auxiliares del tren como son las comunicaciones, la calefacción o la iluminación, y volcar el resto de energía eléctrica a la catenaria.

De este modo, si en ese momento y en el mismo tramo, hay otro tren demandando energía, este aprovechará la energía que ha regenerado el primero. Sin embargo, si no hay más vehículos que necesiten esa energía en el tramo cubierto por la subestación el propio funcionamiento del sistema la encaminará hasta esta, donde se transformará y será inyectada en la red de transporte.

El frenado regenerativo es utilizado en combinación con los frenados descritos anteriormente ya que:

El frenado regenerativo reduce de manera efectiva la velocidad a niveles bajos. Figura 2.13.

La cantidad de energía regenerada está limitada a la capacidad de absorción de ésta por parte de la línea o en el caso de la utilización de almacenadores de energía, al estado de carga de las baterías o los capacitores.

Para los casos en que se utilicen los almacenadores de energía, puede tener lugar un efecto no regenerativo cuando; un vehículo conectado a la red suministradora de energía devuelva energía y los almacenadores estén cargados completamente, siendo necesario en este caso contar con un freno reostático que absorba el exceso de energía. Figura 2.14.

El frenado regenerativo es el sistema de frenado en el que se centra este proyecto, por lo que en apartados posteriores llevaremos a cabo un estudio más exhaustivo del mismo, particularizándolo para el caso del tren de cercanías CIVIA, en donde evaluaremos las ventajas e inconvenientes de la implantación de este sistema de frenado frente al frenado reostático.

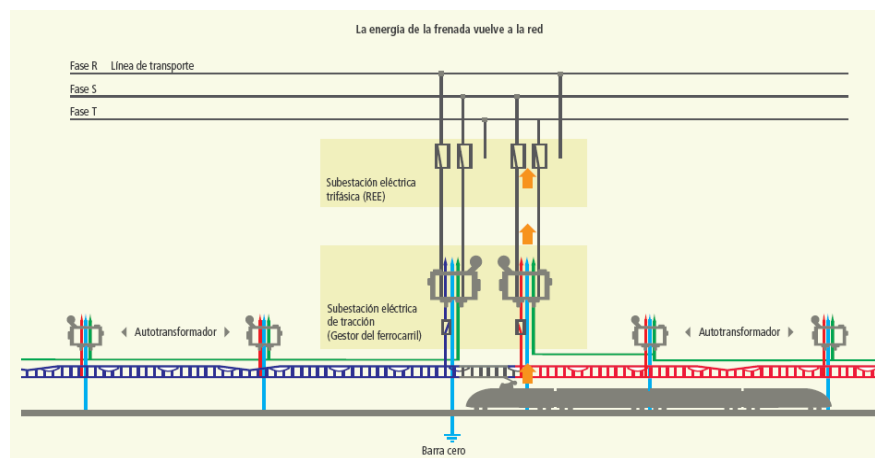


Figura 2.13. Esquema representativo del frenado regenerativo

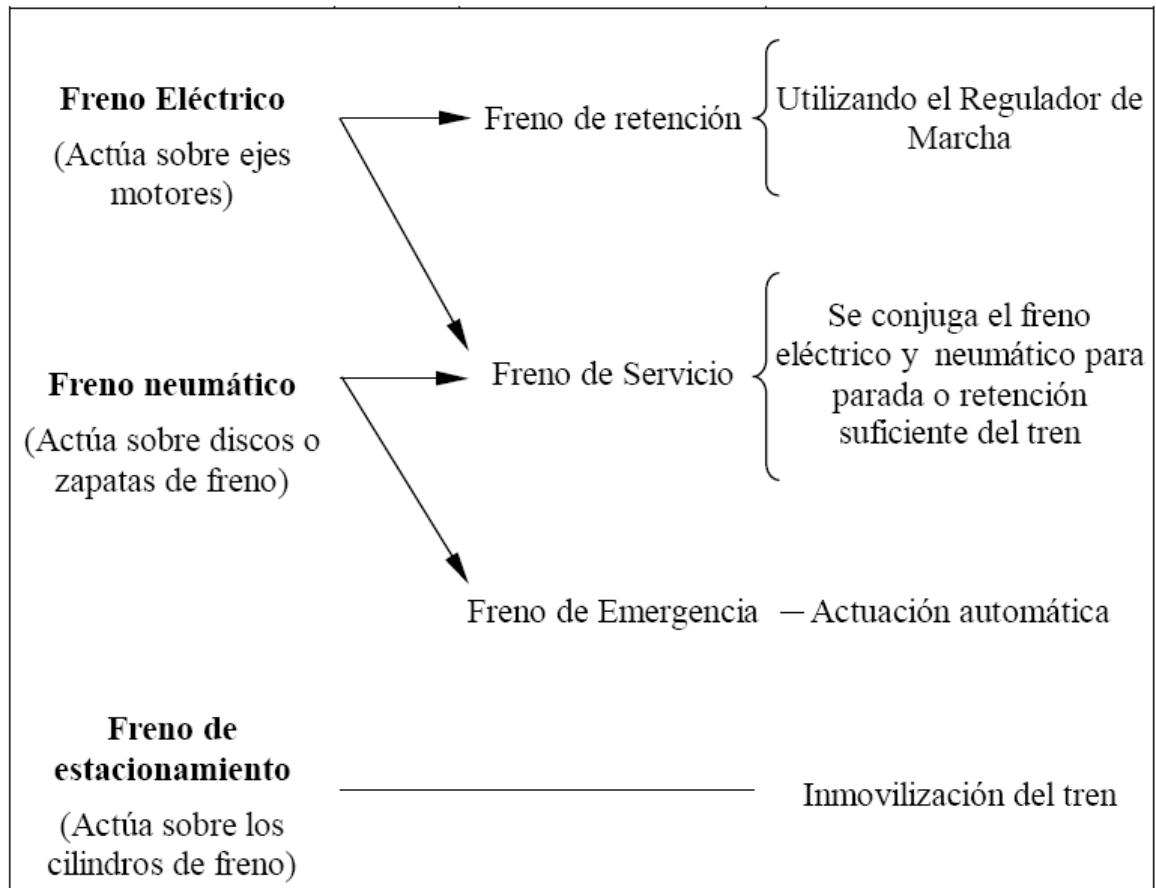


Figura 2.14. Tipos de Freno



3. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE LA SUBESTACIÓN

3.1. DISPOSICIONES LEGALES

Los sistemas capaces de verter energía a la red pública, podrían ser considerados dentro del grupo de generación de Régimen Especial, y aunque de momento no lo son, es conveniente prestar atención al RD 661 por si se incluyera en un futuro.

En España ya es posible devolver energía a la red (un ejemplo de ello es la Línea de AVE que une Madrid y Barcelona). En Alemania, el ICE (INTER-City-Express), y en Japón, el Shinkansen, utilizan actualmente únicamente el freno por recuperación, y por el contrario, en Francia, el TGV utiliza el freno reostático. El atractivo de eliminar el reóstático de frenado hace previsible que en el futuro la tendencia se incline a favor del freno por recuperación, en lugar del mixto. (*Ineco*)

3.2. LA ELECTRIFICACIÓN FERROVIARIA

La energía eléctrica es suministrada a la subestación desde otra subestación o centro de transformación cercano a través de las líneas de alta tensión, a continuación la subestación es la encargada de transformar, rectificar y distribuir la energía eléctrica a la catenaria con el fin de ser entregada al tranvía.

La tensión nominal que entrega la subestación a través de la catenaria al tren de cercanías es de 3000 V de corriente continua que se diferencia del resto de trenes de media o larga distancia en los que a través de la catenaria circula corriente alterna con altos voltajes (25 kV 50Hz).

Los motores del tranvía son motores de corriente alterna, por lo que los 3000 V de corriente continua que suministra la catenaria posteriormente han pasar por un ondulator para pasar a corriente alterna, es decir el tipo de corriente de alimentación del motor del tranvía. El ondulator además nos permite la variación de la frecuencia y de la amplitud de la onda y con ello la variación de la velocidad y el par del motor.

La tensión penetra en la locomotora a través del captador de corriente y retorna cerrando el circuito por los carriles.

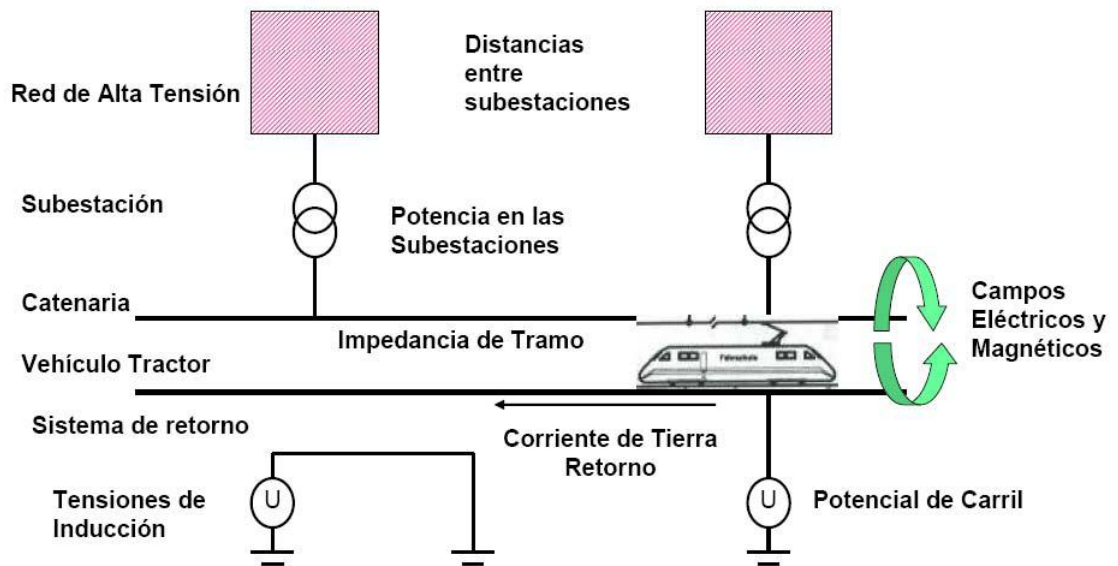


Figura 3.1. Esquema básico de electrificación ferroviaria.

3.3. SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN

Para que por una red ferroviaria puedan circular los trenes con tracción eléctrica es preciso implantar, en los trayectos y en las estaciones, un sistema de alimentación capaz de suministrar al tren, durante todo su recorrido y de forma continuada y adecuada, la energía eléctrica procedente de la red general, convenientemente trasformada y/o rectificada en las subestaciones.

En cuanto a los sistemas de electrificación pueden separarse en dos grupos:

- Línea aérea de contacto superior de catenaria con cierto grado de movimiento
- Línea aérea de contacto superior de catenaria rígida
- Tercer carril

3.4. CATENARIA

Los sistemas de electrificación por catenaria se definen como la línea aérea de contacto tiene un cierto grado de movilidad en altura, lateral y está formada por un conjunto de hilos, cables, soportes, aisladores y otros elementos encargados del reparto de la energía eléctrica. Estas características hacen que hoy en día este sistema de electrificación sea el más generalizado.



3.4.1. Hilo de contacto

El hilo de contacto, del que extrae la unidad ferroviaria, a través de su pantógrafo la energía de alimentación, que se encuentra en la parte superior del tranvía y paralelo a la vía de circulación del tranvía.

El montaje del hilo de contacto se realiza en tramos rectos formando “zig-zag” con la misión del que el frotador del pantógrafo se desgaste de forma regular en su zona central. Dicho frotamiento en tranvías oscila entre los ± 15 cm y los ± 20 cm.

El material del que se fabrica el hilo de contacto es de cobre duro, cobre al cadmio o cobre con plata o selenio para aumentar su resistencia. Las secciones del hilo de contacto dependerán tanto de las intensidades a conducir, como del tipo de corriente que conduzcan, siendo considerablemente mayores las secciones necesarias para una catenaria de corriente continua que para la distribución en corriente alterna. En la Figura 3.2 podemos observar algunas de las distintas formas que pueden tener los hilos de contacto.

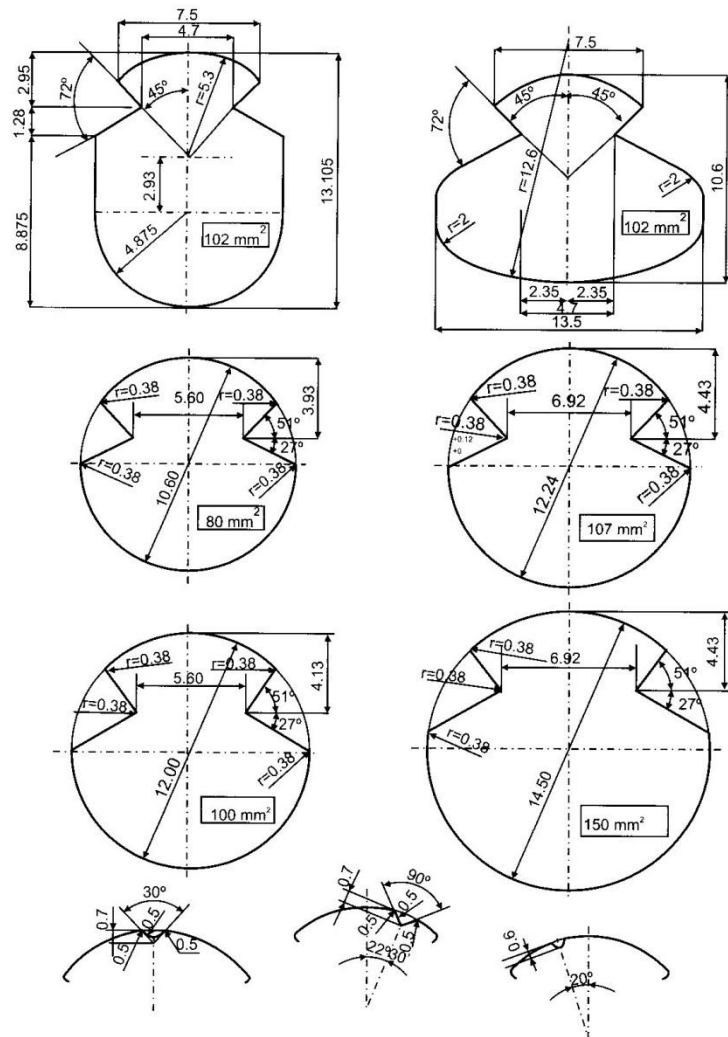


Figura 3.2. Distintas formas de los hilos de contacto

3.4.2. Montajes del hilo de contacto

Respecto al montaje del hilo de contacto existen diferentes tipos, de modo que la adopción de uno u otro sistema depende de la complejidad de la línea, de las intensidades a soportar, la antigüedad de la instalación, etc. En la Figura 3.2 pueden observarse algunos de los distintos montajes de catenaria, que van desde el más elemental que se denomina tranviaria o “trolley” que consta de un único cable o hilo suspendido, hasta otros tipos complejos formados por catenarias compuestas, mallas, etc.

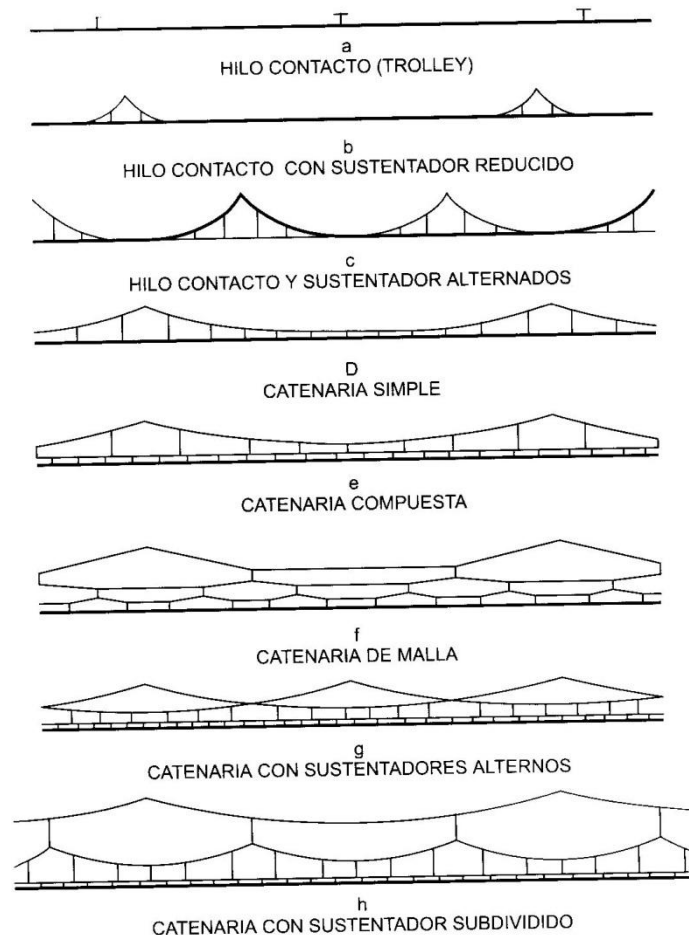


Figura 3.3. Montajes de hilos de contacto

De modo que cada explotación ferroviaria tiene unos determinados montajes de catenaria particularizados para cada caso en concreto, en base a su experiencia, métodos de mantenimiento, etc.

A continuación explicaremos los dos tipos de montajes de catenaria más utilizados para la alimentación de los tranvías:

Catenaria convencional: este tipo de catenaria está formada por un conjunto de equipo de alimentación y suspensión de catenaria mediante postes; montaje que está especialmente destinado a la electrificación de tramos a la intemperie como es el caso que nos ocupa.

La energía se transporta realmente por los cables de “feeder” fabricados en cobre-aluminio. Dichos cables son normalmente desnudos, es decir, sin cubierta protectora aislante y que pueden ser autosoportados mediante un cable adicional de acero. Estos son los encargados de extraer la alimentación al cable sustentador de cobre, que es él quien

realmente adopta la famosa curva de catenaria que da nombre al conjunto. En cuanto al cable sustentador se apoya en los soportes metálicos mediante aisladores.

Entre el cable sustentador y el hilo de contacto sobre el que contacta el pantógrafo se colocan las péndolas verticales y, del propio poste o fijación parte un conjunto de péndola en “V” que permiten la flexión del hilo al paso del tren.

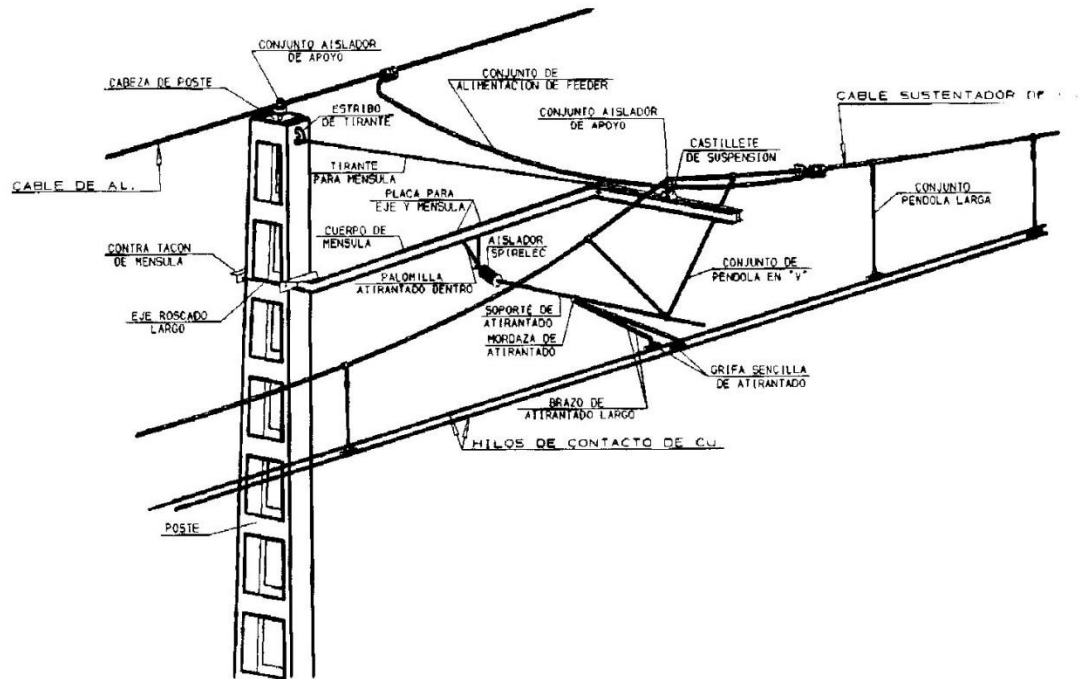


Figura 3.4. Distintos elementos de la catenaria convencional

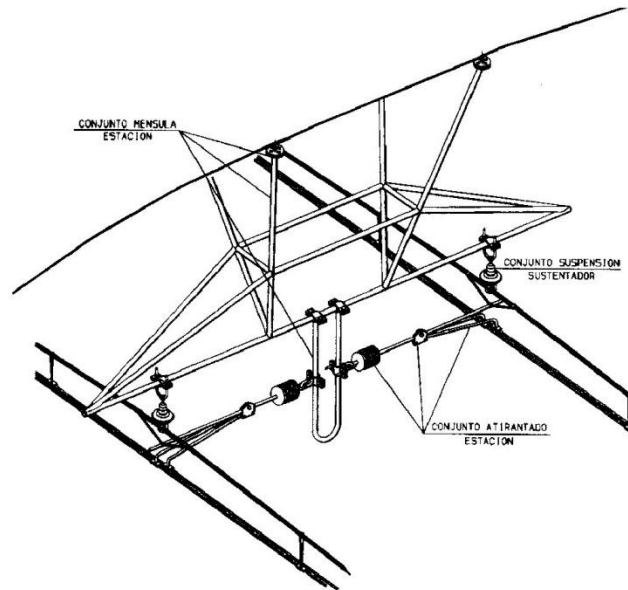


Figura 3.5. Representación simplificada de catenaria convencional

Tranviaria: El caso de línea aéreas de contacto por “tranviaria” es el sistema más simple de los sistemas de montaje de catenaria en el que el número de piezas y la complejidad de la estructura se simplifica, lo que hace que el conjunto sea mucho más rígido e implica un duro contacto catenaria pantógrafo.

Los dibujos mostrados en la Figura 3.6 homólogos a los utilizados anteriormente para la catenaria convencional (Figura 3.5).

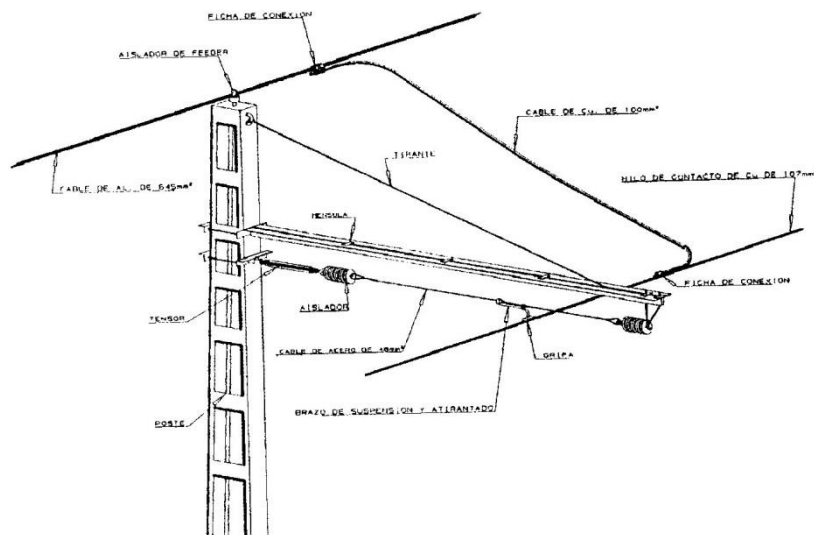


Figura 3.6. Distintos elementos de catenaria tranviaria

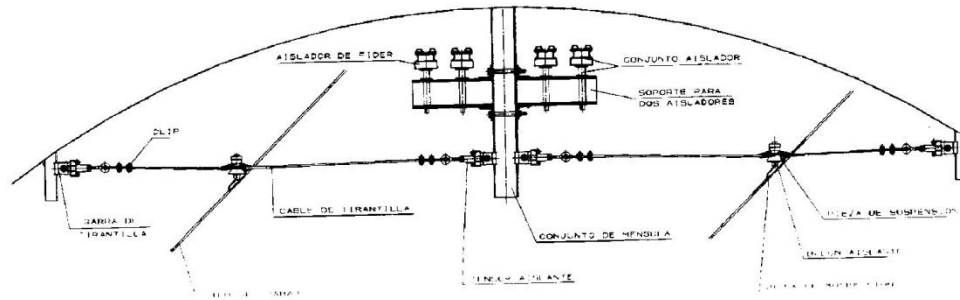


Figura 3.7. Representación simplificada de catenaria tranviaria

El montaje de la tranviaria conlleva la necesidad de un gran número de elementos mecánicos, eléctricos, etc., para su implementación física para cada tipo de explotación.

En principio tanto los sistemas de suspensión, atirantados y anclaje de línea aérea deben hacerse siempre a través de aisladores eléctricos, a fin de que se aisle la línea de corriente y las tierras. Los aisladores suelen estar contruidos de porcelana, vidrio, vidrio-resina o teflón.

Además del aislamiento eléctrico de la tensión de catenaria a líneas de corriente y tierras, es necesario en determinados puntos interrumpir la continuidad eléctrica de un tramo a otro, aunque en el caso de este proyecto no sean necesarias estas interrupciones en la línea. Esto se consigue mediante los denominados aisladores de sección en los que el hilo de contacto se encuentra interrumpido por el aislador que mantiene la resistencia mecánica para soportar la tensión de ambos extremos de contacto.

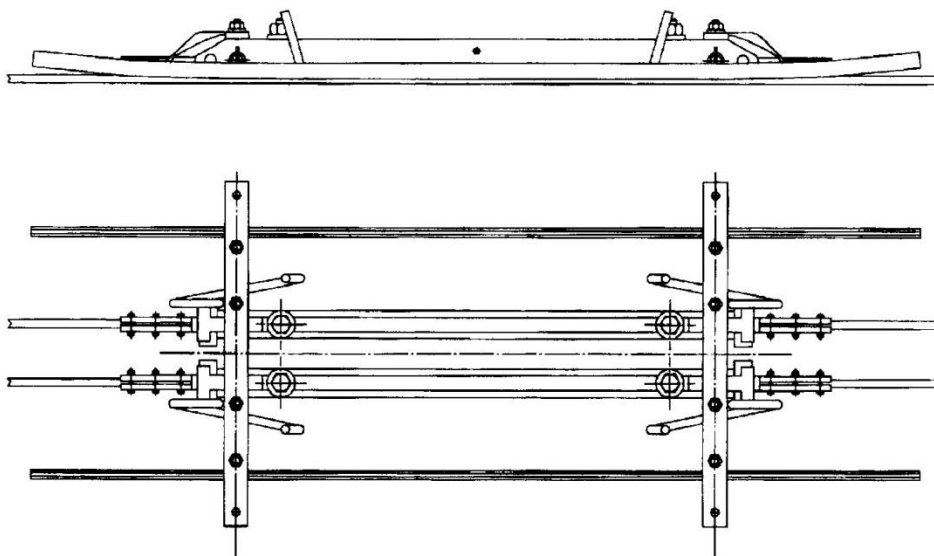


Figura 3.8. Elementos de unión entre las distintas subestaciones



Lógicamente cada uno de los elementos explicados anteriormente, son específicos para cada explotación, particularizándose cada uno de ellos según las características técnicas y mecánicas del objeto a estudio.

3.4.3. Catenaria rígida

Los sistemas explicados anteriormente son los más extendidos a nivel mundial, aunque su principal problema es su alto coste de mantenimiento desde el punto de vista preventivo y a la hora de sustituir los hilos de contacto. Es por ellos que se han buscado alternativas a las catenarias, de modo que esto ha dado lugar a la instalación de líneas aéreas de contacto denominadas “catenaria rígida” y que consisten en un perfil de aluminio, en el que en su parte inferior se fija el hilo de contacto.

En principio este sistema surgió como una alternativa al tercer carril, dando lugar al tercer carril aéreo. La sección transversal del propio perfil de aluminio hace las veces de conductor de energía, pudiéndose prescindir de líneas auxiliares de alimentación. Estos perfiles disponen de unos orificios a fin de evitar condensaciones nocivas aluminio-cobre, además de ser recubiertas por un manguito exterior.

La colocación del hilo de contacto al perfil se realiza de forma simple insertando de manera bobinada el cable en los salientes inferiores.

Respecto al montaje de estos perfiles de aluminio y del hilo de contacto requieren de un dimensionamiento, utillaje y útiles, que nos garanticen una correcta fabricación y un sistema de engrase que asegure la conductividad entre el perfil de aluminio y el hilo de contacto de cobre, que nos permitan menores desgastes que en el caso de catenarias convencionales.

Finalmente, en cuanto a la tornillería de fijación debe ser de acero inoxidable colocados junto con elementos intermedios que aseguren un buen apriete y así, evitando operaciones de mantenimiento posteriores.

3.4.4. Tercer carril

La principal característica de este sistema de captación de energía es que su funcionamiento no se basa en una línea aérea de contacto, en la que la captación se realizaba a través de un pantógrafo articulado, sino que su funcionamiento se basa en un captador de corriente inferior, normalmente instalado en la parte lateral de los bogies cuyo patín de contacto obtiene la intensidad a través de un carril inferior situado a un nivel parecido al de las vías.

La captación de energía a través del tercer carril tiene una serie de ventajas e inconvenientes.

Ventajas: El principal punto fuerte es la simplicidad del montaje que va unido a unos bajos costes de implantación. Otras ventajas son su robustez mecánica, sus bajos costes de mantenimiento y reducción de gálibo.

Inconvenientes: Su punto débil más importantes es el relativo riesgo de electrocución de peatones, o animales, además se ha de tener enormes cautelas a tener en cuenta con la seguridad en operaciones de mantenimiento de trenes en talleres y depósitos, aumento considerablemente la ocupación espacial horizontal, sensibilidad ante la nieve y el hielo y necesidad de interrumpirlo en pasos a nivel y aparatos de vía.

Existen distintos montajes de terceros carriles, tales como acero, acero como soporte de aluminio como conducción eléctrica, de aluminio con forro de acero y mixto de aluminio y cobre.

La posición de las tomas de corriente por tercer carril se diferencian en tomas laterales y tomas inferiores. En ambos casos el diseño mecánico es complejo, teniéndose que tener en cuenta los movimientos del tren o las variaciones de la vía, lo que implica un dimensionamiento con posibles desplazamientos verticales y horizontales.

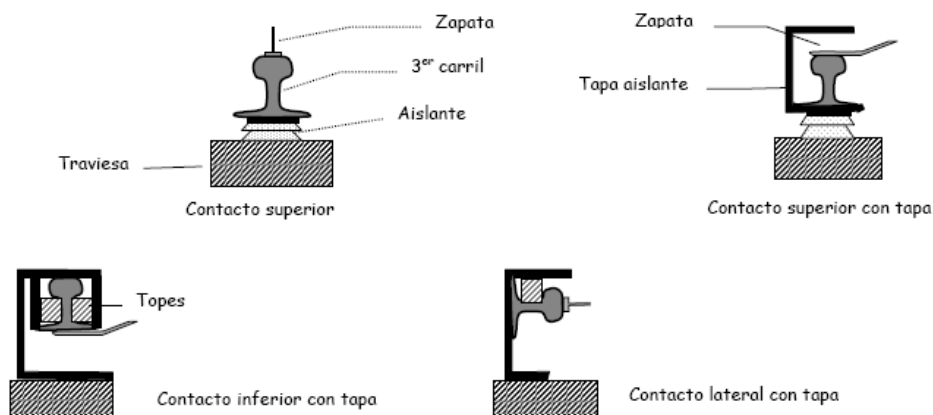


Figura 3.9. Tercer carril

Resumiendo, para todos los sistemas de captación, tanto los de tercer carril como los de captación superior se han de tener en cuenta a la hora del diseño, la explotación y el mantenimiento, las distancias mínimas a mantener entre las partes activas con posibles obstáculos o posibles accesos del personal de operación o mantenimiento. Para ello existe una diversa normativa que debe ser tenida en cuenta como la norma UNE-EN 50119:2002 “Aplicaciones ferroviarias. Instalaciones fijas. Líneas aéreas de contacto para tracción



eléctrica” o la UNE-EN 50112:2002 “Seguridad Eléctrica y puesta a Tierra de de Instalaciones Fijas”.

3.4.5. Otros sistemas de captación

El principal problema de los sistemas anteriores es el derivado del contacto mecánico-eléctrico de dos partes con un movimiento relativo importante y que deben mantenerse firmemente unido en su desplazamiento para asegurar el paso de corriente con la mínima pérdida de energía posible, es decir, mínimo chisporroteo posible.

Los sistemas nombrados anteriormente exigen de importantes costos de mantenimiento derivados de inspecciones preventivas de pantógrafos, catenarias y terceros carriles, sustitución de elementos de contacto, engrases, etc.; que siempre son objeto de estudio para la mejora y optimización, intentando minimizar los costes mediante la variación de las presiones de contacto, mejora del material lubricante, incorporación de elementos de contacto de grafito, etc. Además implica, un impacto ambiental negativo en el casco histórico o recorridos en parques.

No obstante las empresas ferroviarias siguen estudiando sistemas de captaciones nuevos que supongan unos menores costes de mantenimiento, como los que se fundamentan en la captación desde el suelo.

Dentro de este ámbito se están desarrollando varias iniciativas como el sistema electrónico basado en IGBT, cuyo principio es la alimentación por segmentos de 5 metros de longitud mediante un sistema de detección de proximidad por inducción. Los segmentos se encuentran aislados entre sí para que solo haya tensión en un segmento bajo el tren.

Otro sistemas en desarrollo y experimentación es el Stream, que se basa en la toma de corriente mediante un patín inferior de una banda de alimentación conductora, pero con aislamiento por tramos cortos, y que va alimentándose sólo en la zona donde va a hacer contacto la toma de corriente mediante la elevación magnética de una banda de alimentación flexible.

Evidentemente, estos nuevos sistemas de alimentación en desarrollo, además de su costo de implantación, deben concebirse con una elevadísima protección contra el vandalismo y condiciones meteorológicas, deterioros causados por el tráfico y sobre todo una elevadísima seguridad que evite cualquier fallo que pueda desembocar en un accidente por electrificación.

Por otro lado hay que tener en cuenta que estos nuevos sistemas han presentado algunos problemas de puesta en marcha e implantación, asociados a los aislamientos de las

partes conductoras y cajas de conexión, problemas que se proveen solventar en un corto periodo de tiempo.

En relación con los sistemas de captación, y como nombramos anteriormente debemos tener en cuenta la captación de corriente tranviaria, y es la relativa a la contaminación visual que estos sistemas causan sobre cascos antiguos o paisajes.

Con la misión de intentar reducir este impacto visual, algunos fabricantes están desarrollando sistemas de catenaria que se denominan “invisibles” y que se basan en la utilización del mobiliario urbano como sistemas de sujeción vertical

3.5. SUBESTACIONES DE TRACCIÓN

La subestación de tracción es una instalación en la que se acondiciona la energía eléctrica procedente de la red general para que pueda ser utilizada en la tracción de los trenes. Existen dos tipos de subestaciones, según sea el tipo de línea que se va a alimentar, para corriente continua (con tensiones de salida de 1500 y 3000 V) y para corriente alterna (tensión de salida 25 kV y 50 Hz).



Figura 3.10. Subestación

En la subestación se realizan las siguientes funciones:

Transformación de la energía, que procede de la red general en alta tensión, a la tensión a la que se va a alimentar la catenaria.

Rectificación de la corriente alterna a corriente continua en el caso de que la catenaria funcione con este tipo de corriente (líneas convencionales).



Alimentación a la catenaria. Esta función se hace a través de los cables de alimentación, que son los encargados de transportar la energía eléctrica necesaria para la catenaria, desde la subestación hasta los distintos puntos de alimentación previstos en los trayectos.

Suministrar energía tanto para los servicios auxiliares de la propia subestación como para los necesarios dentro del trayecto en el que está instalada.

Tomando como criterio el tipo de corriente de la catenaria se pueden clasificar las subestaciones de tracción en dos grupos principales: subestaciones de corriente continua y las de corriente alterna.

3.5.2. Subestaciones de corriente continua

Una subestación de tracción continua se compone de las siguientes instalaciones:

Instalaciones de alterna: En edificio (si la tensión de alimentación es menor o igual a 20kV) o bien parque de intemperie (Tensión de entrada > 20 kV). La instalación alberga la aparamenta necesaria para la protección y medidas en alta tensión.

Transformadores de potencia: Normalmente, un transformador de 3.300 kVA, con tensión de salida 1700 V, aunque en las ciudades donde hay servicio de cercanías, con gran demanda puntual de energía, se instalan de 6600 kVA.

Transformadores de servicios auxiliares: Suele tratarse de un transformador de 160 kVA y 220 V de tensión de salida, para los circuitos auxiliares de la subestación (alumbrado, tensión para señalización y control) y suministro de energía al transformador de la línea de señales y enclavamientos.

En la figura que aparece a continuación se pueden apreciar los componentes principales de una subestación de corriente continua.

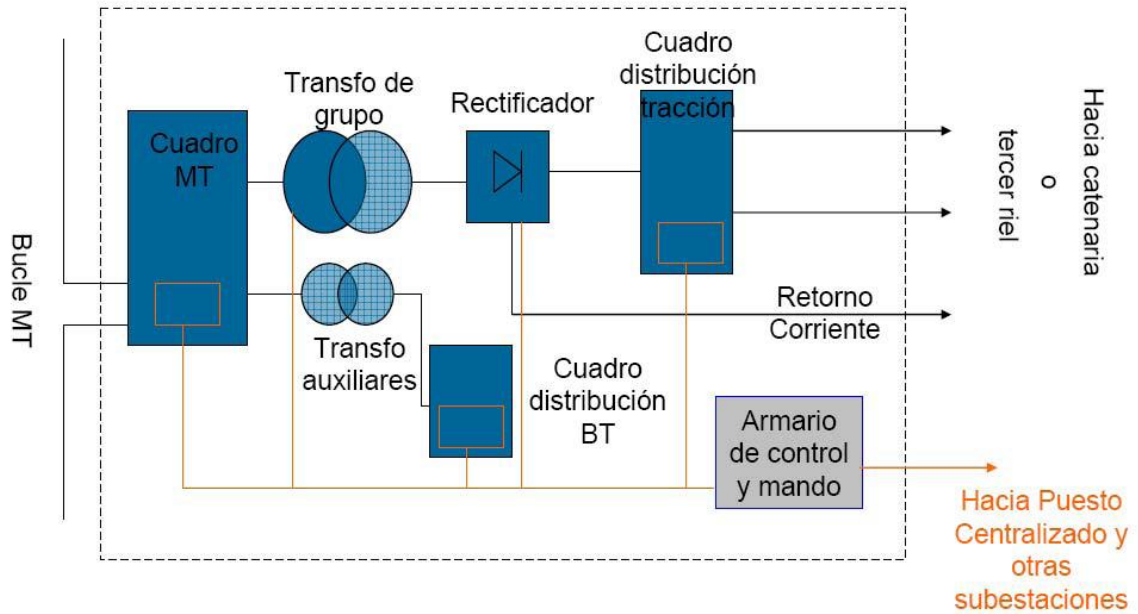


Figura 3.11. Esquema de Subestación de Corriente Continua

Rectificador de potencia: Es el elemento principal de las subestaciones de continua. Los rectificadores son convertidores estáticos de energía, cuya misión consiste en realizar la conversión de la corriente alterna que sale del transformador en corriente continua, mediante diodos de silicio. Estos diodos además de ser de considerable potencia están refrigerados por radiadores de calor de aluminio. La rectificación se consigue con diodos de silicio, a través de dos puentes trifásicos en serie. Normalmente hay dos grupos de rectificadores por razones de fiabilidad.

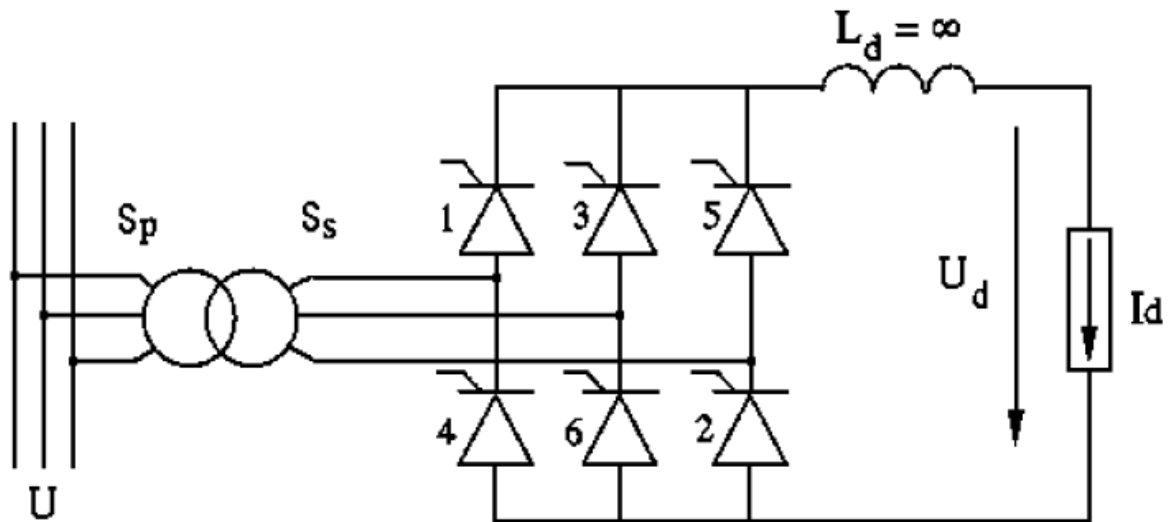


Figura 3.12. Rectificador



Otros elementos a destacar en éste tipo de subestaciones son los filtros de corriente y de armónicos y los disyuntores extra rápidos (interruptores de gran capacidad de ruptura y elevada rapidez de respuesta).

3.5.3. Subestaciones de corriente alterna

Cada subestación dispone de dos transformadores y cada transformador dos grupos de relés de protección, denominados principal y de reserva.

Existe un armario de servicios auxiliares que tiene centralizados todos los magneto térmicos de la instalación, tanto de corriente alterna como de corriente continua para los servicios auxiliares, este armario alimenta mediante una batería para garantizar la continuidad.

La diferencia fundamental entre estas subestaciones de corriente alterna y las de continua radica en el equipo de rectificación, que en alterna obviamente no es necesario, lo que supone una importante ventaja, ya que la ausencia de los rectificadores facilita en gran medida la reversibilidad. La mayoría de las subestaciones de corriente alterna no presentan ningún impedimento para devolver energía a la red.

4. POSIBLES SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

El consumo de energía eléctrica supone en todas las Empresas ferroviarias una parte muy importante del presupuesto de la misma, que ronda el 10% de los costes de una Empresa ferroviaria.

Desde finales de los setenta se comenzaron a generalizar los sistemas de tracción basados en técnicas “chopper”, cuya función era la eliminación de la resistencia de arranque en los motores de corriente continua, debido a la incorporación de interruptores controlados y bobinas de aislado.

Esta técnica de tracción posibilitó la recuperación de energía en el frenado, gracias a un cambio de configuración electrónica y haciendo que los motores de tracción actuaran como generadores, transformando una parte de la energía cinética del tren en energía eléctrica que se devolvía a la red, para ser consumida por otro tren que se encontrase acelerando, o consumiendo energía en ese momento.

La incorporación de sistemas de tracción trifásicos posteriormente, permitió sustituir los motores de corriente continua por motores de corriente alterna con un mínimo de mantenimiento, lo que desembocó en una mayor posibilidad de recuperación de energía en los procesos de frenado, dada la mejora tecnológica en los sistemas de control con potentes reguladores de marcha basados en microprocesadores. Los motores de corriente alterna permitían actuar de generadores hasta prácticamente la parada del tren; extremo que no se puede conseguir con las máquinas de corriente continua debido a las necesidades de excitación de campo que exigen.

Esta mayor posibilidad de que los motores de corriente alterna pudiesen recuperar energía es teórica, ya que desde el punto de vista del cálculo empírico, las unidades de tren eléctricas pueden recuperar como máximo un 40% de la energía tomada de la red, aunque este valor está condicionado a la coincidencia de un tren traccionando en el mismo sector de catenaria cuando el tren regenerante está frenando.

Los estudios realizados por las Empresas ferroviarias metropolitanas y de tranvías con configuraciones óptimas de su red de tracción (elevadas tensiones de trabajo, gran tráfico, sectores amplios, etc.) muestran que en “situaciones ideales” se puede aprovechar hasta un 70% de la energía de frenado. Esto quiere decir que incluso en la “situación ideal” se pierde como mínimo un 30% de la energía recuperable de freno, esta pérdida de energía se produce en forma de calor, en el propio motor-generador, en pérdida aerodinámica o en pérdidas por rozamiento con la vía.

De manera que esta situación ha sido estudiada detalladamente por los ingenieros y técnicos de las Administraciones ferroviarias metropolitanas y de tranvías y, aunque ya se dispone de sistemas avanzados de tracción capaces de recuperar energía eléctrica, se están estudiando formas y métodos para lograr su mejor aprovechamiento de la energía.

4.1.1. Soluciones tecnológicas destinadas a reducir el consumo energético y optimizar la tensión de suministro de tracción.

El hecho de que la mayoría de Redes ferroviarias metropolitanas y de tranvías utilicen tensiones de alimentación en continua (600, 750, 900, 1.200, 1.500 y 3000 V) implica disponer de sistemas de subestaciones rectificadoras con diodos rectificadores y en la mayoría de los casos tiristores y GTO (Tiristores de desactivación por compuerta).

Esta situación hace que si no podemos regular perfectamente mediante los sistemas de regulación de tráfico, los procesos de frenado de trenes con el arranque de otros en el mismo sector de tracción, existen dos formas de aprovechar la energía recuperada del freno que serán:

- Devolución a la línea.
- Utilización de “elementos almacenadores de energía” que funcionen en paralelo con las subestaciones rectificadoras.

4.1.2. Requerimientos de los sistemas acumuladores de energía

Los requerimientos principales que se deben considerar a la hora de elegir un sistema acumulador de estático de energía son:

- Elevada resistencia ante los ciclos de trabajo
- Alto rendimiento
- Alta energía y potencia específica
- Alta seguridad eléctrica y mecánica
- Buenas posibilidades de regulación
- Bajos costes de mantenimiento e inversión

A continuación se expondrán por orden cronológico los sistemas con los que se ha ensayado junto con sus ventajas y sus inconvenientes.

4.1.3. Sistemas de acumulación por baterías

A priori parece una solución simple ya que solamente se trata de incorporar un sistema de baterías de plomo o de níquel-cadmio, conexas en serie un número tal de vasos que la tensión total del conjunto sea la de la Red de tracción.

Las baterías, no obstante y como es conocido, tienen limitaciones de potencia (intensidad) en las cargas y descargas, además su elevado peso y volumen, solo permiten un número determinado de ciclos de trabajo. Todo ello, unido a los exigentes requerimientos de su instalación (ventilación de cuartos, instalaciones eléctricas antideflagrantes, etc.) ha hecho abandonar esta iniciativa.

4.1.4. Sistemas de acumuladores inerciales de energía

Para este sistema tenemos que partir de que la energía cinética de un sólido rígido que gira alrededor de un eje que se define en la Ecuación (3.1).

$$T = \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (3.1)$$

Además la velocidad de cualquier partícula es proporcional a la velocidad de rotación y a su radio de giro: $v_i = \omega r_i$, por lo que teniendo en cuenta que el sumatorio de las masas individuales de un cuerpo por su radio de giro al cuadrado es el momento de inercia Ecuación (3.2).

$$T = \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \sum \frac{1}{2} m_i \omega^2 r_i^2 = \frac{1}{2} \omega^2 \sum m_i r_i^2 \quad (3.2)$$

De la Ecuación (3.2) deducimos que la energía cinética de un sólido girando es:

$$\boxed{T = \frac{1}{2} I \omega^2} \quad (3.3)$$

El acumulador inercial se basa en una máquina que gira alimentada de la energía eléctrica recuperada por los trenes en su proceso de freno eléctrico. Esta energía eléctrica se convierte en cinética de rotación que, a su vez es devuelta en el proceso siguiente para alimentar un tren que se encuentre acelerado.

Existen varias empresas que han experimentado con este tipo de sistema y disponen de tecnología patentada. Entre ellas podemos destacar dos, por un lado Tessag-Piller y por otro Siemens.



Tessag-Piller ha instalado su sistema en el metro ligero de Hannover Ustra, con dos acumuladores inerciales de 1MW de potencia cada uno y baja velocidad de rotación, lo que aloja reservas energéticas para periodos máximos entre 10 y 20 segundos.

Siemens ha desarrollado e instalado otro sistema en el metro de Colonia basado en un sistema homologo al anteriormente citado pero con velocidad de rotación máxima de 18.000 r.p.m., lo que posibilita que la energía almacenada sea muy superior al sistema de Tessag-Piller para volúmenes iguales de potencia, teniendo en cuenta que la energía cinética, como se ha nombrado anteriormente es proporcional al cuadrado de la velocidad angular, y permitiendo periodo de trabajo muy superiores.

Su construcción se basa en un volante de inercia a base de fibra de carbono que gira dentro de una carcasa en la que se ha hecho el vacío. El conjunto motor-generador trabaja en un campo creado por imanes permanentes, pero para conseguir estas elevadas intensidades, además de la construcción en vacío y refrigerada, precisa de cojinetes magnéticos y otras particularidades mecánicas avanzadas que hace muy complejo su mantenimiento.

Por otra parte cabe destacar en este tipo de acumuladores de energía inerciales los desarrollos y evoluciones llevadas a cabo por los equipos de Formula Uno con el fin de poder utilizar esta tecnología denominada K.E.R.S. (Kinetic Energy Recovery System) cuyo principio de funcionamiento es el mismo que el de los trenes, pero para su aplicación en la alta competición. Este componente funciona obteniendo la energía que se disiparía en forma de calor en las frenadas, acumulándola en un volante de inercia. La idea es que esa energía almacenada otorgue una potencia extra de 60 kW (unos 81 CV / 80 HP) durante aproximadamente 6,67 segundos en la fase de aceleración tras la frenada, cuando el disco de inercia gira a unas 60.000 rpm.

4.1.5. Acumuladores de energía mediante bobinas superconductoras

El acumulador de energía mediante bobinas conductoras o SMES (Superconductive Magnetic Energy Storage) se trata de un sistema muy moderno de almacenamiento de energía y sobre el que no se dispone de gran cantidad de información.

Estos acumuladores de energía solo están disponibles en aplicaciones de electromedicina (resonancia magnética) y en equipos de alimentación ininterrumpida para ordenadores.

En el ámbito de los ferrocarriles este tipo de acumuladores de energía permanecen en un nivel puramente teórico.

4.1.6. Acumuladores de energía con condensador de doble estrato

Estos acumuladores están basados en la tecnología de condensadores de doble estrato que se ha optimizado para su uso como medio acumulador, ofreciendo ventajas importantes como tecnología para acumuladores. Junto a su alto rendimiento, destaca principalmente su capacidad de cambios de carga con dinámica elevada y excelente aptitud para el trabajo cíclico.

A ello hay que añadir que los condensadores de doble estrato, como el de la figura 4.1, a diferencia de los acumuladores de energía rotativos, están totalmente exentos de mantenimiento y que su capacidad de acumulación de energía puede escalarse o bien conectarse en cascada.

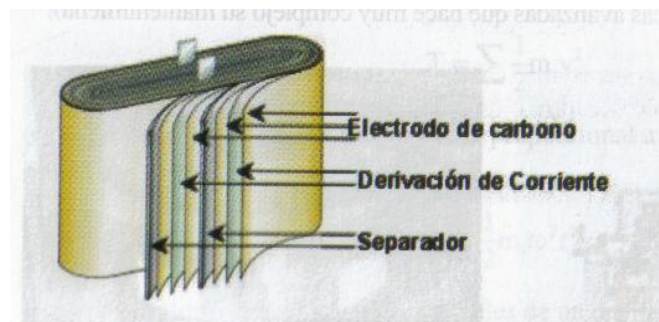
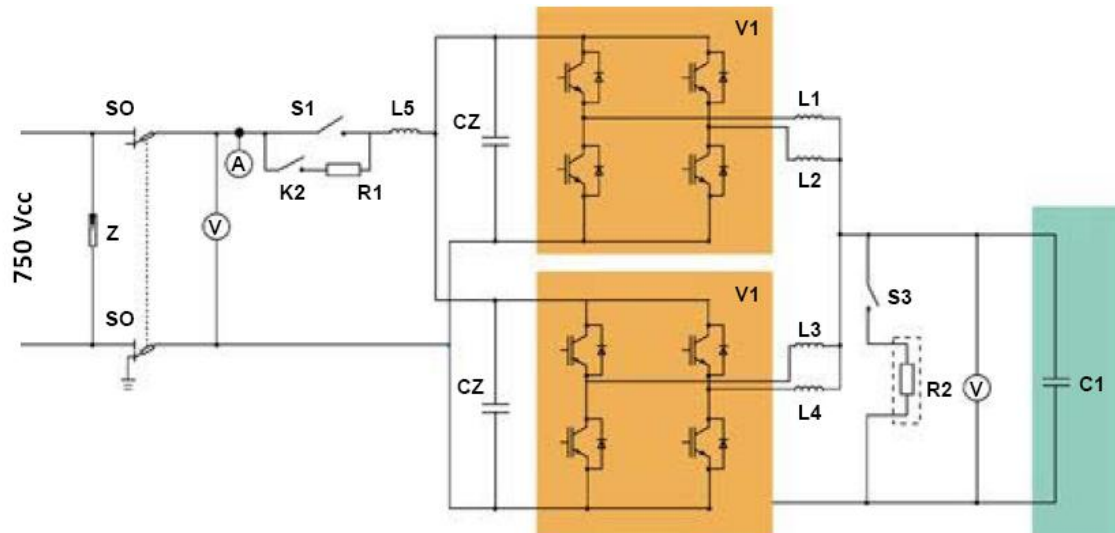


Figura 4.1. Condensador de doble estrato

Este sistema consta de una unidad acumuladora de condensadores que se conecta a la red de tracción de corriente continua a través de un convertidor con unidad de conexión como se muestra en la figura 4.2.



| | | | | | |
|----|--------------------------|----|-----------------------------------|------|-------------------------------------|
| Z | Autoválvula | R1 | Resistencia para la pre-carga | L1-4 | Inductancia del chopper |
| SO | Seccionador de seguridad | L5 | Inductancia para el filtro de red | S3 | Interruptor resistencia de descarga |
| S1 | Relé de red | CZ | Condensador circuito intermedio | R2 | Resistencia de descarga |
| K2 | Relé de pre-carga | V1 | Chopper | C1 | Unidad acumulador condensadores |

Figura 4.2. Conexionado de un condensador a la línea de 750 Vcc

4.1.7. Acumuladores de energía con supercondensadores

Los ultracondensadores llevan varios años en el mercado, pero con las nuevas tecnologías se ha conseguido hacerlos cada vez mas compactos. Los ultracondensadores están constituidos por dos electrodos conformados n constituidos por dos electrodos conformados por un colector de corriente sobre la cual se deposita un sustrato poroso, el electrolito el cual es comprimido entre los poros del sustrato, y una interfase que separa físicamente la parte positiva de la negativa del elemento, pero que permite el intercambio iónico. En la fabricación de estos ultracondensadores se utiliza comúnmente una lámina de aluminio como colector de corriente, carbón activado altamente poroso para el sustrato y el electrolito puede ser orgánico o acuoso.

Cuando el ultracondensador está descargado el electrolito facilita la formación tanto de aniones como de cationes en el interior del elemento, una vez se aplica una tensión al dispositivo, los cationes son atraídos hacia el electrodo negativo y los aniones hacia el electrodo positivo, formando un capacitancia de doble capa entre los aniones y las partículas con carga positiva del electrodo positivo y entre los cationes y las partículas con carga negativa del electrodo negativo.



Los materiales estudiados como electrodos para supercondensadores son principalmente de tres tipos:

Óxidos de metales de transición: se han conseguido valores de capacidad muy altos, pero estos supercondensadores tienen la desventaja de que son excesivamente caros y por lo tanto sólo se utilizan en aplicaciones militares y en la industria aeroespacial.

Polímeros conductores: El uso de este tipo de supercondensadores también puede dar lugar a capacidades relativamente altas, pero estos materiales presentan el inconveniente de que sufren hinchamiento y contracción, lo cual es indeseable puesto que pueden ocasionar la degradación de los electrodos durante el ciclado.

Materiales de carbono se presentan como los materiales activos del electrodo más ventajosos, debido a su bajo coste relativo, elevado área superficial (pueden superar los 2500 m² g⁻¹) y gran disponibilidad. Además, los materiales de carbono pueden presentar unas estructuras diferentes (materiales gráfiticos, grafitizables o no grafitizables) y están disponibles en una gran variedad de formas (fibras, telas, aerogeles o nanotubos).

Las principales ventajas técnicas de los supercondensadores son:

- Acumulación de grandes cantidades de energía
- Alta velocidad de recarga
- Gran capacidad de ciclado
- Pueden proporcionar corrientes de carga altas
- No necesita mantenimiento
- Trabaja en condiciones de temperatura muy adversas
- No presenta en su composición elementos tóxicos

Por otro lado, tienen como principal desventaja que todavía dependen de los avances que se produzcan en la tecnología desarrollada por los investigadores y aplicada por las empresas especializadas a nivel mundial.

La utilización de este tipo de acumuladores supone una inversión media-alta, aunque una solución sencilla, y muy apropiada para aplicaciones ferroviarias, aunque esté a expensas de su desarrollo tecnológico en los próximos años.

4.2. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS ACUMULADORES DE ENERGÍA

4.2.1. Ventajas:

Los acumuladores de energía correctamente seleccionados y dimensionados pueden absorber la totalidad de la energía generada por las unidades y devolverla cuando estas necesiten energía durante el proceso de aceleración.

Los acumuladores de energía pueden integrarse directamente en la subestación, es decir, en paralelo con el rectificador, o en cualquier punto de la red eléctrica.

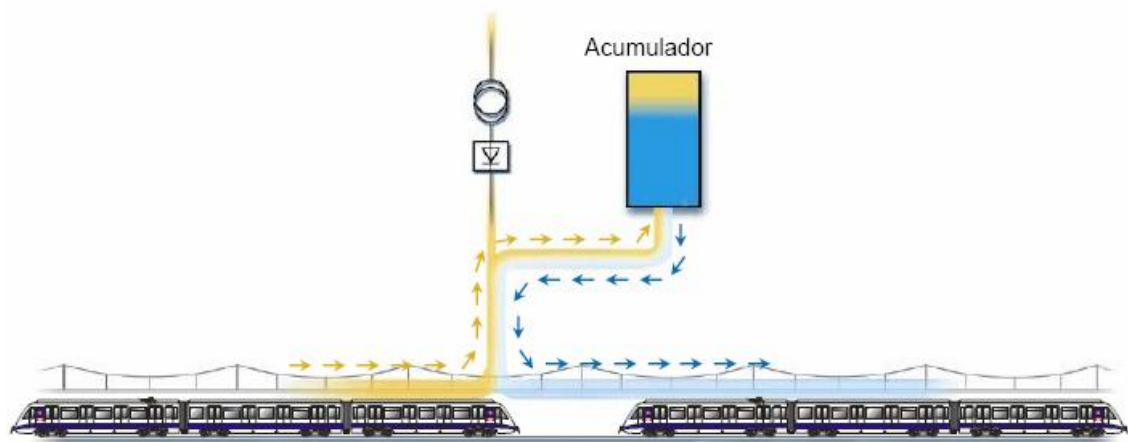


Figura 4.3. Esquema de la acumulación de energía

Teniendo como meta el conseguir reducir el consumo de energía, la utilización de acumuladores de energía ofrece las siguientes ventajas, en función del lugar de montaje elegido así como la estrategia de regulación:

Aprovechamiento de la energía de frenado y reducción de los costes de explotación

Reducción de los picos de potencia

Reducción de la emisión de CO₂ por la reducción del consumo energético

Estabilización de la tensión de tracción

Reducción de la tensión de contacto

Reducción de la potencia nominal de las subestaciones

Recuperación de trenes durante fallos de suministro cortos

Mayor distancia entre subestaciones



Reducción del coste total del sistema como primera implantación

4.2.2. Inconvenientes:

Incorporación de modernas tecnologías con los costes de adaptación y formación asociados

Tecnologías aún poco experimentadas

Pocas empresas oferentes y, por tanto sector relativamente cautivo

4.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS ACUMULADORES DE ENERGÍA

4.3.1. Dinámica del sistema acumulador

El beneficio del almacenamiento de energía está influenciado fundamentalmente por su alta interacción dinámica con todos los posibles estados de marcha de un sistema ferroviario. El intercambio directo de la energía de frenado con otros vehículos que se encuentran acelerando tiene la máxima prioridad, por lo que el sistema de control del acumulador debe reconocer dicho estado para no almacenar directamente la energía intercambiable y suministrarla más tarde con pérdidas en la conversión.

Por otro lado, el acumulador debe responder rápidamente a los cambios en la línea, de modo que se pierda la mínima energía posible en las resistencias de frenado, debiéndose garantizar que el acumulador está permanentemente preparado para absorber la energía del frenado.

La respuesta dinámica de la unidad de control del acumulador estático siempre garantiza un intercambio óptimo de potencia con el sistema. La energía de frenado que no puede ser utilizada directamente se almacena y permanece disponible como energía adicional para procesos de aceleración posteriores.

El hecho de recibir y entregar energía se regula en función de las pequeñas variaciones de la tensión de tracción. La estrategia de recibir y entregar del acumulador estático y, por lo tanto, el concepto de regulación debe adaptarse a la meta que se desea alcanzar y que puede ser:

Estabilización de la tensión en la catenaria

Ahorro máximo de energía

Supresión de los picos de potencia en la red

4.3.1. Dimensionado del sistema acumulador

El diseño básico del contenido de energía de un sistema acumulador es muy importante para la aplicación económica del sistema, ya que, se trata de determinar la energía que debe tener el acumulador partiendo de los datos técnicos de la unidad.

La cantidad de energía que debería poder almacenar el acumulador viene dada por la energía cinética del vehículo, es decir, por su velocidad y por su masa.

En definitiva, los acumuladores estáticos de energía son una alternativa ventajosa en las redes de corriente continua cuando al aumentar el tráfico en la línea se necesita medidas para estabilizar la tensión de la catenaria y optimizar el número de subestaciones. Asimismo, la utilización de acumuladores de energía contribuye al ahorro del coste de energía y a la mejora ecológica.

4.4. PRINCIPIO DE SOPORTE DE LA TENSIÓN EN LA CATENARIA

Para asumir la función de contrarrestar la caída de tensión el acumulador de energía, por un lado, debe estar en condiciones de entregar energía durante todo el proceso de arranque de la unidad móvil y por otro lado, suministrar una corriente acumulada con una magnitud determinada durante el lapso de descarga, para mantener la tensión en los niveles deseados.

Estos dos parámetros característicos, contenido de energía y corriente de descarga del acumulador, se deben ajustar a las necesidades reales del conjunto de forma óptima.

La corriente acumulada destinada a la entrega debe ser determinada por la tensión en las bornas del propio acumulador. Para que el acumulador pueda entregar energía debe haber recibido energía previamente. El objetivo de una regulación para un soporte de tensión es mantener, en la medida de lo posible, cargado el acumulador de forma completa. Lógicamente el acumulador solo podrá ser cargado si la tensión está a un nivel superior al umbral de descarga. Además la duración de descarga del acumulador debe ser suficiente larga. En consecuencia, la energía puede proceder tanto de la subestación, como de una unidad mediante el proceso de recuperación de energía en el frenado, que alimenta la red a la cual está conectado el acumulador.

5. APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA DE FRENADO REGENERATIVO

Uno de los objetivos prioritarios de las empresas ferroviarias es la disminución del consumo energético de los trenes, y no solo para minorar los costes energéticos, que suponen más del 20% de los gastos de explotación, sino para reducir el impacto medioambiental originado por la producción de energía eléctrica.

Para ello una de las medidas es la potenciación del empleo del Sistema de Freno Eléctrico de Recuperación.

El transporte ferroviario, urbano y de cercanías, es el modo de transporte más eficiente energéticamente, que existe actualmente tal y como puede verse en la Tabla 5.1.

| Consumo energético por viajero en KWh | Automóvil (ocupación 1,25 personas) | Autobús (ocupación 25%) | Metro (ocupación 23%) | Cercanías (ocupación 21%) |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | 0.75 | 0.31 | 0.22 | 0.22 |

Tabla 5.1. Comparación consumo energético de distintos medios de transporte

Datos procedentes de la Revista de la U.I.T.P (Unión Internacional de Transportes Públicos)

Sin embargo y dado el elevado número de viajeros transportados por las diferentes empresas el consumo energético total es muy elevado, por lo que es de gran interés disminuirlo en lo posible.

5.2. POSIBLES SISTEMAS DE UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA RECUPERADA

Actualmente el sistema de freno de los trenes utiliza durante la conducción normal del tren exclusivamente el Freno Eléctrico, de recuperación y/o reostático, con preferencia del primero sobre el segundo. De tal modo que la energía eléctrica producida en los motores de tracción, que durante el proceso de frenado del tren se transforman en generadores de energía eléctrica, es enviada a la Red Catenaria, la cual recibe esa energía eléctrica siempre y cuando exista otro tren próximo absorbiendo energía, es decir traccionando y únicamente en el supuesto de que no exista otro tren cercano traccionando, utiliza el Freno Reostático proceso en el que la energía eléctrica generada es enviada a las Resistencias de Freno Eléctrico del Tren que está frenando, donde es disipada en forma de calor.



Así vemos como el valor real de la energía devuelta a la red depende del valor de la tensión de catenaria, pues si esta es superior a 3,6 kVcc no se admite la energía procedente del tren que está frenando y de la existencia de un tren próximo que esté traccionando y pueda absorber la energía eléctrica producida por el tren que está frenando.

Se deduce que el valor real de la energía devuelta a la red catenaria, será tanto mayor cuanto mayor sea la densidad de tráfico en las zonas por donde circula el tren, y cuanto menor sea la tensión catenaria, cuyo valor teórico de trabajo debe ser de 3,3 kV y no superar nunca el valor de 3,6 kV.

Los mayores inconvenientes de usar acumuladores son:

- Alto número de ciclos de carga.
- Procesos de carga y descarga en tiempos muy reducidos.
- Altos niveles de potencia.

Fundamentalmente existen dos emplazamientos posibles para estos acumuladores; pueden ir alojados en el tren, o situados en tierra en las subestaciones.

5.3. ACUMULADROES EMBARCADOS

Los dispositivos de almacenamiento de energía integrados en el tren presentan la ventaja de facilitar la continuidad de suministro eléctrico de algunos servicios incluso en caso de fallo en el sistema de alimentación externo, por tanto, lo más adecuado para alcanzar un compromiso entre fiabilidad de suministro y capacidad de almacenamiento parece ser el empleo de sistemas mixtos, es decir acumuladores embarcados y en tierra.

Los acumuladores embarcados tienen limitaciones, principalmente su peso y volumen, ya que no se puede lastrar un tren más de unas pocas toneladas sin afectar a su rendimiento y consumo.

En Alemania se está probando un prototipo de este sistema en el tranvía de Mannheim (Alemania). El sistema consiste en un banco de ultracondensadores de 1kWh, de unas dimensiones de 1900mm x 950mm x 455mm y un peso de 450 kg como vemos en la Figura 5.1. (*International Union of Railways*)



Figura 5.2. Tranvía con acumuladores embarcados

Este sistema consigue reducir los picos de corriente que demanda el tranvía así como las pérdidas de potencia de la subestación. Una de las mayores ventajas de este sistema es que permite aumentar la distancia entre subestaciones para las futuras líneas.

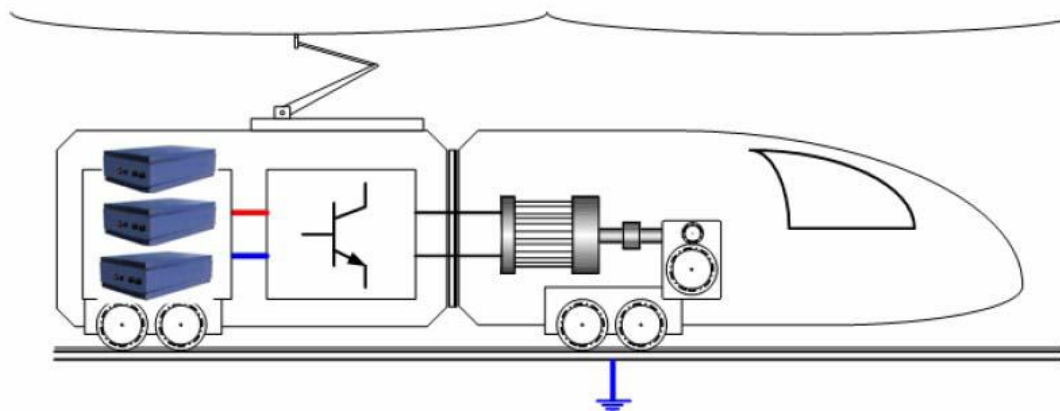


Figura 5.3. Esquema básico de ultracondensadores en un tren.

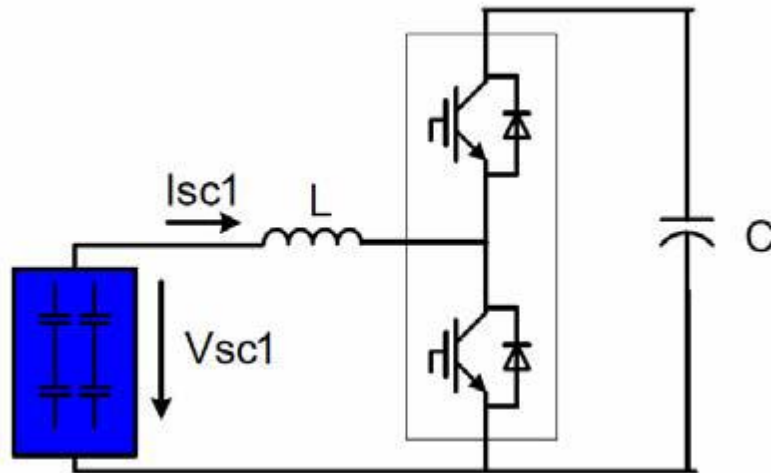


Figura 5.4. Esquema eléctrico de conexión de ultracondensadores.

Los inconvenientes de este sistema es que necesitamos espacio adicional para colocar los bancos de ultracondensadores, y además aumentamos la masa del tren en torno a un 3%, y la masa está directamente relacionada con el consumo.

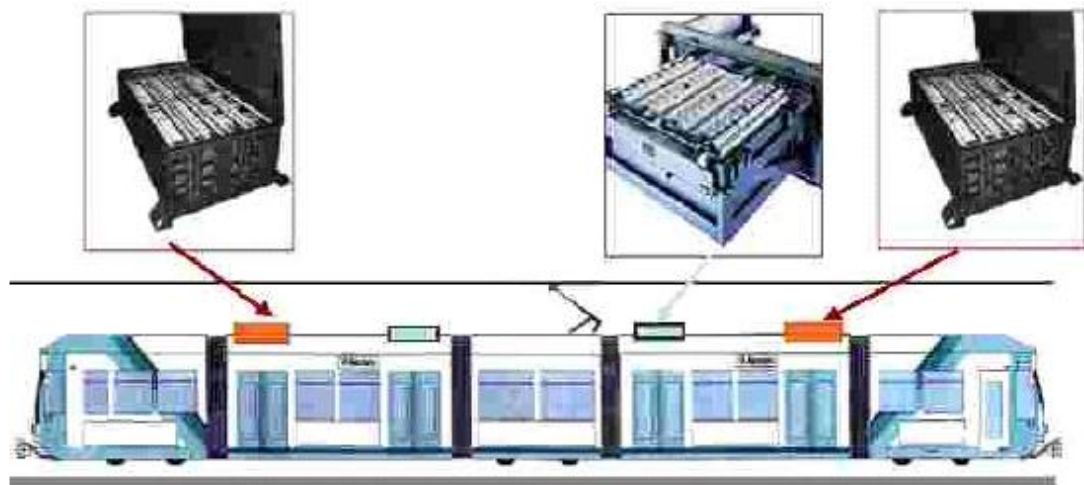


Figura 5.5. Localización de los sistemas de SC embarcados

El presente proyecto se plantea fijar el sistema de almacenamiento de la energía en la subestación, usando esta energía como fuente para cargar los coches eléctricos y de esta manera fomentar la incorporación del VE.

5.4. ACUMULADORES EN TIERRA

Otra opción es la de instalar los acumuladores en tierra, evitando el problema del peso excesivo del tren y la ocupación de espacio extra.

Desde el punto de vista de la eficiencia energética es más apropiado devolver a la Red la energía regenerada que almacenarla, ya que el rendimiento asociado a los procesos de acumulación de energía difiere de la unidad. Figura 5.6



Figura 5.6. Proceso de devolución de energía eléctrica a la red.

A la hora de devolver la energía a la Red se presentan diversos problemas, que son el principal motivo de que se haya retrasado el desarrollo y aplicación de ésta innovación:

Será necesario instalar equipos específicos destinados a ese fin.

Deben existir sistemas de medida que la contabilicen y gestionen, así como elementos que puedan proporcionar una alternativa en caso de que la Red no pueda asimilar esa energía. Actualmente se están haciendo estudios de la calidad de la energía para poder sacar beneficio económico cuando se devuelve dicha energía a la red.

Como se ha explicado anteriormente, a la hora de devolver la energía regenerada a la Red, se distingue entre dos tipos de subestaciones. Subestaciones de corriente alterna y de corriente continua.

5.4.2. Subestaciones de corriente alterna

En principio no existe ningún impedimento para que se produzca la devolución a la red a través de subestaciones de corriente alterna. Se podría decir que este tipo de subestaciones son de por sí reversibles. En el caso de la Línea de Alta Velocidad de Madrid – Barcelona, actualmente ya se está devolviendo a la red.

El principal problema es que la mayoría de las líneas no se alimentan en corriente alterna.

5.4.3. Subestación de corriente continua

Una de las diferencias fundamentales con respecto a las subestaciones de corriente alterna es el puente de diodos rectificador situado tras el transformador reductor. Se

encarga de realizar el cambio de corriente alterna proveniente de la red a corriente continua con la que se alimenta la catenaria.

Además de ser de considerable potencia están refrigerados por radiadores de calor de aluminio. Éste dispositivo sólo admite la circulación de corriente en un solo sentido. Por consiguiente, para que las subestaciones de corriente continua sean reversibles es necesario instalar equipos de inversores de cuatro cuadrantes, cuyo dimensionamiento estará relacionado con el volumen de energía que esté previsto recuperar.

En la Figura 5.7 aparece representado en color negro el esquema eléctrico de una subestación de corriente continua no reversible, y en color verde la instalación de equipos necesaria para que la subestación pueda devolver parte de la energía regenerada a la Red de abastecimiento

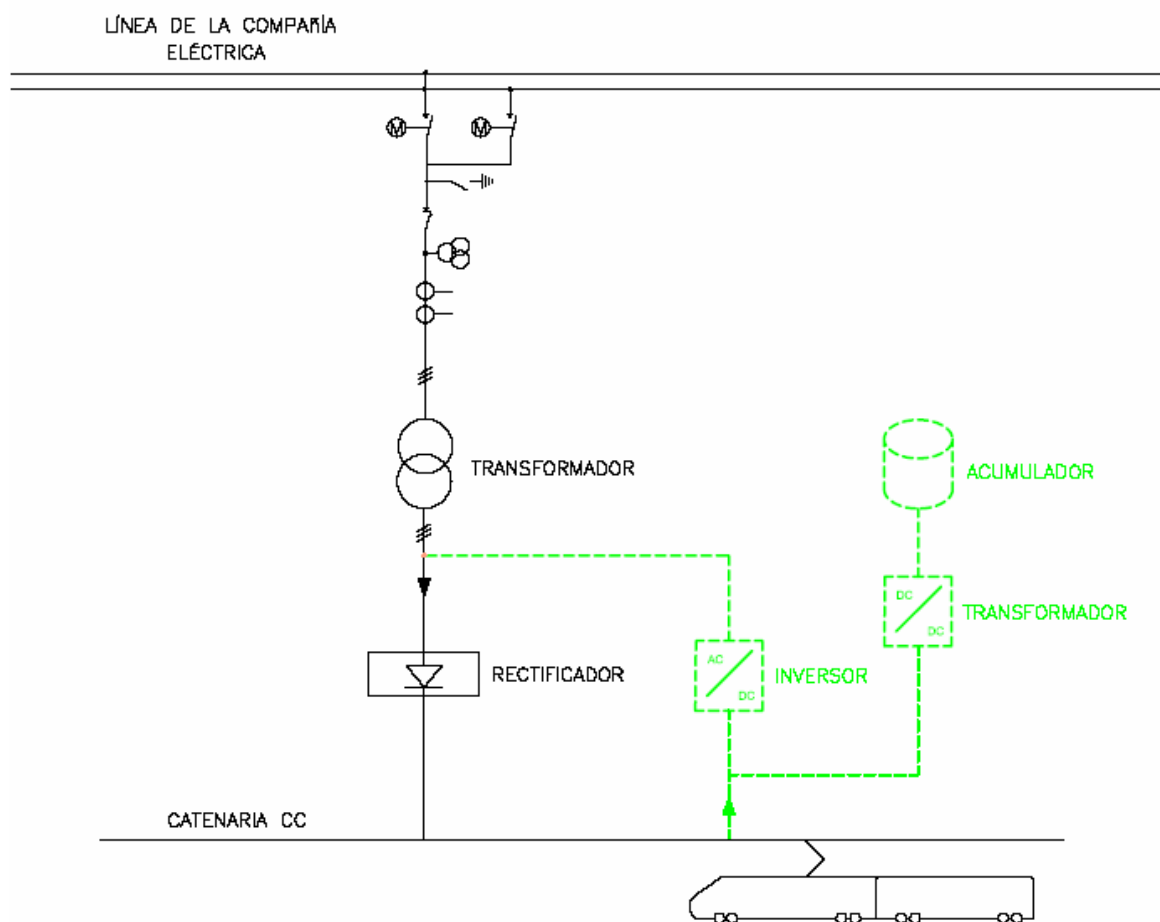


Figura 5.7. Esquema Subestación de Corriente Continua con Inversor

El inversor de cuatro cuadrantes se encarga de “inyectar” corriente alterna en el lado de baja del transformador de potencia, a partir de la energía en corriente continua procedente del tren. En caso de que no resulte interesante o posible la devolución a la red, sería



conveniente disponer de un sistema de acumulación que dote al sistema de cierto margen de maniobra.

6. CÁLCULO DE LA ENERGÍA DE FRENADO REGENERATIVO

En este capítulo se procede a realizar el estudio técnico de un sistema que permita reutilizar la energía regenerada de los trenes en una estación determinada. Este estudio se ha dividido en tres partes: Elección de la estación más favorable, cálculo de la energía regenerada y cálculo de la capacidad necesaria de almacenamiento.

6.1. ELECCIÓN DE LA ESTACIÓN MÁS FAVORABLE

Primero se procede a escoger dentro de las estaciones ferroviarias en España cuál resulta más idónea para este proyecto. Como se ha mencionado anteriormente, en España hay dos tipos de tensión de catenarias, alto voltaje (25 kV AC), y media tensión (3 kV DC). Nos centraremos en las líneas de 3 kV.

Es preciso indicar que el consumo energético de un tren es función, básicamente de la tara del tren, del número de viajeros transportados, de las características físicas de las líneas por las que circula (rampas, pendientes, curvas) y de la distancia entre estaciones.

Así pues se ha escogido la línea de Cercanías de Madrid que son las líneas de Cercanías españolas con más consumo energético, como consecuencia del perfil geográfico de las mismas (rampas elevadas de hasta 35% y numerosas curvas de pequeño radio), y sobre todo por el elevado número de estaciones existentes, lo que origina que la distancia media entre las mismas sea inferior a 2,5 km, lo que da lugar a un elevado número de arranques, que es el proceso de explotación en el que se consume más energía y también de frenados, proceso en el que se regenera la energía.

Aparentemente la línea con más pendiente dentro de la red de cercanías de Madrid es la línea Colmenar-Atocha, pero debido a la frecuencia de los trenes, a la proximidad de sus estaciones y el incremento de consumo provocado por los viajeros, como podemos ver a continuación, obtenemos que la línea más idónea será la línea Móstoles-Fuenlabrada.

| Consumo energético | Colmenar-Atocha | Atocha-P.Pio | P.Pio-Chamartín | Chamartin-Alcalá | Fuenlabrada-Móstoles |
|--------------------|-----------------|--------------|-----------------|------------------|----------------------|
| kW/h Absorbidos/km | 4,34 | 7,26 | 7,85 | 7,82 | 10,38 |
| kW/h Devueltos/km | 2,65 | 4,11 | 2,12 | 4,62 | 5,33 |
| kW/h Consumidos/km | 1,68 | 3,15 | 5,73 | 3,2 | 5,06 |

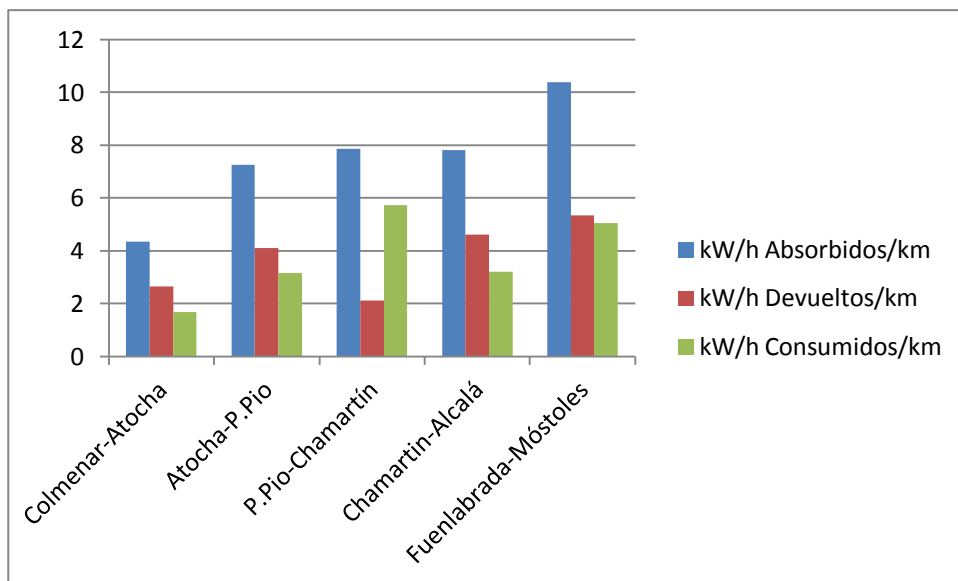


Figura 6.1. Consumo energético de diferentes líneas de cercanías de Madrid

Con el objetivo de conocer el consumo energético del tren se han realizado diversas medidas en condiciones reales de explotación, con aceleración y deceleración máximas, y circulando con la máxima velocidad que admitían las líneas. Las medidas han sido realizadas con los trenes en tara y en idénticas condiciones de explotación.

Actualmente por las líneas de Cercanías circulan trenes del tipo Serie 447 y Civia, este último más moderno. Como podemos observar en la siguiente tabla para la realización del Civia se ha mejorado el consumo y la energía regenerada significativamente. Con el paso del tiempo el porcentaje de energía regenerada aumentará según lo haga la tecnología.

MÓSTOLES→FUENLABRADA

| TREN SERIE | 56 Viajeros (25%de la capacidad máxima de plazas sentadas) | 223 VIAJEROS (100% de la capacidad máxima de plazas sentadas) | 808 VIAJEROS (sentados+de pie a razón de 6 viajeros por m2) |
|------------|--|---|---|
| CIVIA | 3,17 | 3,44 | 4,4 |
| 447 | 5,17 | 5,53 | 6,68 |

Tabla 6.1. Consumo específico del TREN, por número de viajeros (kwh/km)

LÍNEA COLMENAR→ATOCHA

| TREN SERIE | 56 Viajeros (25%de la capacidad máxima de plazas sentadas) | 223 VIAJEROS (100% de la capacidad máxima de plazas sentadas) | 808 VIAJEROS (sentados+de pie a razón de 6 viajeros por m2) |
|------------|--|---|---|
| CIVIA | 2,46 | 2,67 | 3,41 |



| | | | |
|-----|------|------|------|
| 447 | 3,64 | 3,91 | 4,81 |
|-----|------|------|------|

Tabla 6.2. Consumo específico del TREN, por número de viajeros (kwh/km)

En el futuro la flota estará compuesta enteramente por trenes CIVIA, por este motivo todos los cálculos se harán en el supuesto de que todos los trenes son de este tipo.

Se ha visto que la línea MÓSTOLES-FUENLABRADA, es la línea más favorable para ubicar la ferrolinera, debido a la frecuencia de trenes y número de viajeros. Ahora se pasará a decidir qué estación es más favorable. Para ello tendremos en cuenta únicamente dos factores, la energía devuelta a la catenaria y la utilidad de los viajeros de dicha estación. Será necesario que un gran número de viajeros utilicen el coche para acercarse a esta estación y que dicha estación tenga espacio suficiente para las plazas de los coches y para ubicar los distintos dispositivos necesarios de nuestra estación.

Condiciones de Cálculo de energía:

- Línea: Móstoles-Fuenlabrada y Fuenlabrada-Móstoles
- Vehículo: Tren Civia de 4 coches
- Tensión del circuito intermedio: 3600 V
- Carga máxima
- Se utiliza únicamente el freno eléctrico
- Velocidad del viento frontal: 15 km/h
- Velocidad máxima: 120 km/h

| | Recorrido (km) | Tiempo de viaje (s) | E. consumida Tracción (kWh) | E. devuelta freno (kWh) | E. total consumida (kwh) |
|----------------------------|----------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Móstoles-Alcorcón | 3,709 | 156 | 54,4 | -19,3 | 37 |
| Alcorcón-Valderas | 1,612 | 98 | 16,5 | -12 | 4,5 |
| Valderas-Cuatro Vientos | 3,243 | 162 | 42,6 | -23,9 | 18,7 |
| Cuatro Vientos-Las Águilas | 1,132 | 74 | 11,7 | -14 | -2,2 |
| Las Águilas-Fanjul | 0,768 | 58 | 15,3 | -11,9 | 3,4 |
| Fanjul-Aluche | 0,682 | 56 | 9,3 | -9,8 | -0,4 |
| Aluche-Laguna | 2,485 | 135 | 16,9 | 18,6 | -1,6 |
| Laguna-Embajadores | 3,932 | 222 | 27,3 | -21,1 | 6,1 |



Aprovechamiento de la energía de frenado regenerativo de
los trenes de cercanías en las estaciones La Serna y Parque Polvoranca

| | | | | | |
|--------------------------------|-------|-----|------|-------|------|
| Embajadores-Atocha | 1,195 | 89 | 27,8 | -7,8 | 19,9 |
| Atocha-Méndez Alvaro | 0,653 | 51 | 9,2 | -11,4 | -2,1 |
| Méndez Alvaro-Doce de Octubre | 2,855 | 143 | 24,3 | -16,8 | 7,4 |
| Doce de Octubre-Orcasitas | 1,629 | 97 | 28,4 | -9 | 19,4 |
| Orcasitas-Puente Alcocer | 1,741 | 96 | 30,5 | -18,8 | 11,6 |
| Puente Alcocer-Villaverde Alto | 1,403 | 83 | 25,7 | -9,6 | 16,1 |
| Villaverde Alto-Zarzaquemada | 3,1 | 133 | 53,5 | -17,4 | 36,1 |
| Zarzaquemada-Leganés | 2,46 | 119 | 48,8 | -17,8 | 30,9 |
| Leganés- P. Polvoranca | | | | | |
| P. polvoranca-La Serna | 4,04 | 163 | 39,1 | -22,3 | 16,8 |
| La Serna-Fuenlabrada | 1,578 | 89 | 31,6 | -15,4 | 16,2 |

Tabla 6.3. Energía de la línea MÓSTOLES-FUENLABRADA

| | Recorrido (km) | Tiempo de viaje (s) | E. consumida Tracción (kWh) | E. devuelta freno (kWh) | E. total consumida (kwh) |
|--------------------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| Alcorcón-Móstoles | 3,709 | 156 | 54,4 | -19,6 | 37 |
| Valderas Alcorcón | 1,612 | 98 | 16,5 | -11,1 | 4,5 |
| Cuatro Vientos-Valderas | 3,243 | 162 | 42,6 | -16,8 | 18,7 |
| Las Aguilas-Cuatro Vientos | 1,132 | 74 | 11,7 | -11 | -2,2 |
| Fanjul-Las Aguilas | 0,768 | 58 | 15,3 | -8,8 | 3,4 |
| Aluche-Fanjul | 0,682 | 56 | 9,3 | -10,7 | -0,4 |
| Laguna-Aluche | 2,485 | 135 | 16,9 | -12,3 | -1,6 |
| Embajadores-Laguna | 3,932 | 222 | 27,3 | -18,6 | 6,1 |
| Atocha-Embajadores | 1,195 | 89 | 27,8 | -8,7 | 19,9 |
| Méndez Alvaro-Atocha | 0,653 | 51 | 9,2 | -9,3 | -2,1 |
| Doce de Octubre-Méndez Alvaro | 2,855 | 143 | 24,3 | -11,6 | 7,4 |
| Orcasitas-Doce de Octubre | 1,629 | 97 | 28,4 | -11,1 | 19,4 |
| Puente Alcocer-Orcasitas | 1,741 | 96 | 30,5 | -17,2 | 11,6 |
| Villaverde Alto-Puente Alcocer | 1,403 | 83 | 25,7 | -10,1 | 16,1 |
| Zarzaquemada-Villaverde Alto | 3,1 | 133 | 53,5 | -12,2 | 36,1 |
| Leganés-Zarzaquemada | 2,46 | 119 | 48,8 | -17,8 | 30,9 |
| P. Polvoranca-Leganés | | | | | |
| La Serna-P. Polvoranca | 4,04 | 163 | 39,1 | -18,3 | 16,8 |
| Fuenlabrada-La Serna | 1,578 | 89 | 31,6 | -20,2 | 16,2 |

Tabla 6.4. Energía de la línea Fuenlabrada-Móstoles

Se procede a sumar la energía regenerada de ambos sentidos de cada estación.

| | |
|-----------------|-------|
| Alcorcón | -30,4 |
| Valderas | -28,8 |
| Cuatro Vientos | -34,9 |
| Las Aguilas | -22,8 |
| Fanjul | -22,6 |
| Aluche | -22,1 |
| Laguna | -37,2 |
| Embajadores | -29,8 |
| Atocha | -17,1 |
| Méndez Alvaro | -23 |
| Doce de Octubre | -27,9 |
| Orcasitas | -26,2 |
| Puente Alcocer | -28,9 |
| Villaverde Alto | -21,8 |
| Zarzaquemada | -35,2 |
| Leganés | -36,1 |
| P. Polvoranca | |
| La Serna | -42,5 |
| Fuenlabrada | -15,4 |

Tabla 6.5. Energía de las estaciones de la línea Móstoles-Fuenlabrada y Fuenlabrada-Móstoles

Se observa que la estación con mayor energía regenerada es La Serna. Dicha estación es válida ya que tiene un número considerable de usuarios que se trasladan en coche a esta estación, y desde ahí cogen el Cercanías a Madrid. Además como se puede ver en el mapa de la Figura 7.2 y 7.3 dicha estación tiene espacio suficiente para situar la ferrolinera.

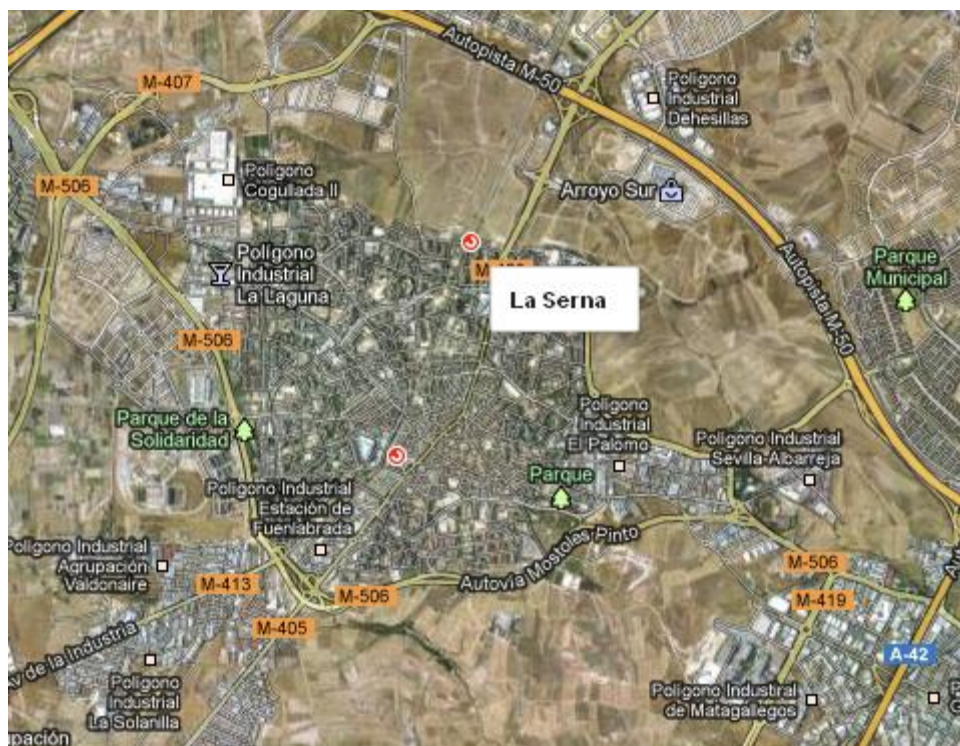


Figura 6.2. Ubicación Estación La Serna

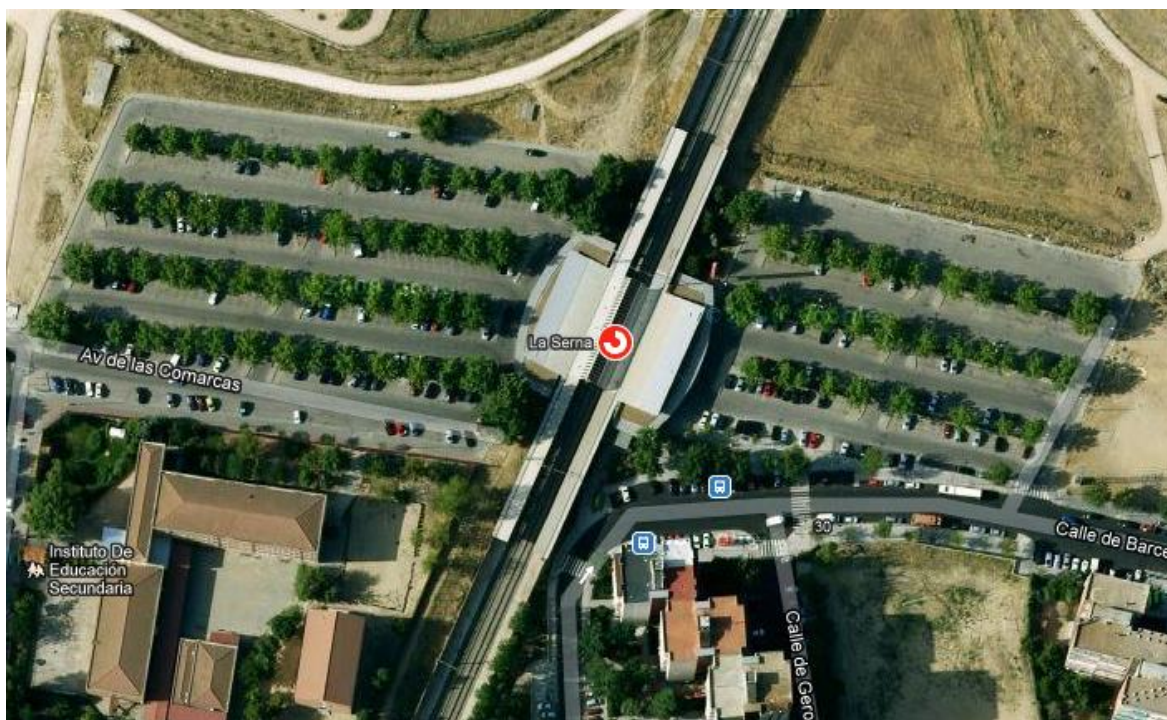


Figura 6.3. Estación La Serna



6.2. CÁLCULO GENERAL DE LA ENERGÍA DE UN TREN

6.2.1. Ecuación del movimiento del tren

Cuando aparece una fuerza neta longitudinal F (resultante de la resistencia al avance, de la fuerza gravitatoria y de las fuerzas de tracción y frenado) sobre un tren de masa M , el tren cambia su velocidad, y lo hace de acuerdo con la segunda ley de Newton o principio fundamental de la dinámica:

$$F = M \times a \quad (6.1)$$

F : Fuerza resultante de las fuerzas longitudinales que actúan sobre el tren. (kN)

$M(t)$

$a \text{ (m/s}^2\text{)}$

$$a = \frac{F}{M} \times 10^2 \quad (6.2)$$

Si la fuerza neta es positiva, entonces el tren aumenta su velocidad, pues la aceleración resulta mayor que 0; mientras que si la fuerza neta es negativa (porque la tracción es menor que la resistencia al avance o porque la fuerza del freno es mayor que la fuerza de la gravedad en la bajada) entonces la aceleración es negativa y el tren disminuye su velocidad.

Si además tenemos en cuenta los esfuerzos de tracción o de freno, la resistencia al avance, las fuerzas gravitatorias y el efecto de las masas giratorias, la ecuación final que define la aceleración del tren como consecuencia de la acción de las diferentes fuerzas que intervienen mientras avanza por el trazado propuesto sería:

$$a = \frac{F_t + M \times g \times p - F_f - M \times g \times r - A - B \times V - C \times T_f \times V^2 - M \times \frac{600}{R}}{\left(M + \sum \left(M_{gi} \times \frac{r_i^2}{R_i^2} \right) \right)} \quad (6.3)$$

Donde:

- La fuerza de tracción (F_t) es incompatible con la fuerza del freno

(F_f), y la fuerza de la pendiente de valor p es incompatible con la fuerza de la rampa de valor r .

- M es la masa del tren, expresada en toneladas (t)



- V es la velocidad del tren, expresada normalmente en kilómetros por hora (km/h).
- A , B y C son coeficientes que dependen de las características físicas del material rodante, que se miden, respectivamente, en $[daN]$, $[daN/(km/h)]$ y $[daN/(km/h)^2]$.
- g es la gravedad, en m/s^2 .
- M es la masa del conjunto giratorio, en t .
- r es el radio de inercia polar del conjunto, en m .
- R es el radio de las ruedas motrices, en m .
- p peso
- r radio de la curva

A partir de la aceleración se puede obtener el trabajo (W) o esfuerzo realizado por el tren, teniendo en cuenta que:

$$dW = F \times dr \quad (6.4)$$

Integrando a cada segundo la fuerza por el desplazamiento en ese periodo de tiempo, el trabajo resultante será:

$$W_{ab} = \int_a^b F \times dr \quad (6.5)$$

Para obtener los kWh consumidos o regenerados, a partir del trabajo (Julios) sólo hay que emplear la siguiente relación:

$$1 kWh = \frac{1000 J}{1 s} \times 3600 s = 3600000 J \quad (6.6)$$

Otra forma de obtener la Energía será mediante la fórmula 6.7.

$$E = P \times t \quad (6.7)$$



Donde:

P : Potencia

E : Energía

t : tiempo

La energía es proporcional a la potencia y al tiempo. Como la potencia no es proporcional en todo el trayecto se puede dividir la potencia en intervalos de un segundo y calcular el sumatorio de la energía generada por cada segundo.

En la figura que aparece a continuación se describen en detalle las fuerzas longitudinales que actúan sobre el tren clasificadas entre las que tienden a favorecer el movimiento del tren y las que tienden a retenerlo.

| Fuerzas aceleradoras | Fuerzas retardadoras | Depende de ... | Fórmula |
|---|---|--|--|
| | Resistencia al avance en recta y horizontal | Masa, velocidad, forma y tipo de tren | $R_{avh} = (A + BV + CV^2)$ |
| | Acción gravitatoria en rampa | Masa del tren, inclinación de rampa | $R_{ag} = - i \times M \times g$ |
| Acción gravitatoria en pendiente | | Masa del tren, inclinación de la pendiente | $R_{ag} = + i \times M \times g$ |
| | Resistencia de la curva | Masa del tren, Radio de la curva | $R_{ac} = -M \times \frac{800}{R}$ o $R_{ac} = -M \times \frac{600}{R}$ |
| Esfuerzo de tracción | | Potencia, velocidad, adherencia | $E_t = Min(+\frac{P_t}{V}, -(M \times K_a))$ |
| | Esfuerzo de frenado | Potencia frenado, masa, adherencia | $E_f = Min(-\frac{P_f}{V}, -(M \times K_a))$ |
| Notas: (1) En túnel, se añade el <i>Factor de túnel</i> , T_f que multiplica a V^2 . Con viento, aumenta el valor de esta resistencia. (2) Unidades: M , en t; Resistencias y esfuerzos, en daN; V en km/h; R en metros; P en kW; i en mm/m; A , B y C son coeficientes. K_a es el coeficiente de adherencia. | | | |

Tabla 6.6. Resumen de fuerzas longitudinales que actúan sobre el tren.



6.2.2. Potencia y fuerza

Cuando todos los ejes son propulsores, el peso adherente es igual al peso de la locomotora. El peso de las locomotoras, a diferencia de los camiones, se distribuye uniformemente en todos los ejes.

Para que haya movimiento con rodamiento, la fuerza propulsora debe ser menor que el producto del peso adherente (Pa) por la adherencia (Ψ), es decir $Ft \leq Pa \cdot \Psi$, sino hay movimiento con deslizamiento. Si hay deslizamiento aparecen problemas en la circulación por lo que se busca andar siempre en rodamiento.

Como se ha comentado anteriormente, la potencia es el trabajo realizado por unidad de tiempo, por lo que usando las unidades usuales, se tiene que:

$$P(kW) = \frac{F(kg) \times v(\frac{km}{h})}{cte} \quad (6.8)$$

El fabricante indica qué porcentaje de la potencia se usa a través de un coeficiente llamado rendimiento mecánico, que generalmente varía entre 82 y 87%.

Como la potencia es constante, al graficar la fuerza tractiva en función de la velocidad, se obtiene una hipérbola. Pero esto no es del todo correcto, ya que en el arranque la velocidad sería nula y por tanto la fuerza tractiva infinita. En realidad, la fuerza tractiva está limitada por la adherencia continua que es un parámetro dado por el fabricante, que generalmente vale entre 21% y 27%. Así se tiene la mínima velocidad a la que una locomotora puede traccionar sin sufrir problemas, que generalmente ronda los 10km/h y es llamada velocidad crítica. Mientras que la velocidad supere ese valor mínimo, la locomotora puede traccionar indefinidamente sin hacer sufrir al motor. Normalmente, en el tablero de la locomotora se tiene un indicador de cuánto tiempo se puede andar a velocidades por debajo de la velocidad crítica, y también se tiene un sistema que detecta el deslizamiento, mejorando la adherencia en el arranque. Así la gráfica fuerza en función de velocidad es entonces una hipérbola para velocidades mayores a la crítica y se une en línea recta desde el punto crítico a la fuerza tractiva en el arranque. Un riel húmedo tiene menor adherencia, por lo que las locomotoras tienen un sistema de arenado, que va tirando arena sobre riel dado que ésta es una sustancia abrasiva.

Los datos de esfuerzos de tracción y freno siguen los mismos parámetros y son proporcionados por el fabricante. Para calcular la potencia se usará la gráfica de esfuerzo de freno teniendo en cuenta la resistencia de avance.

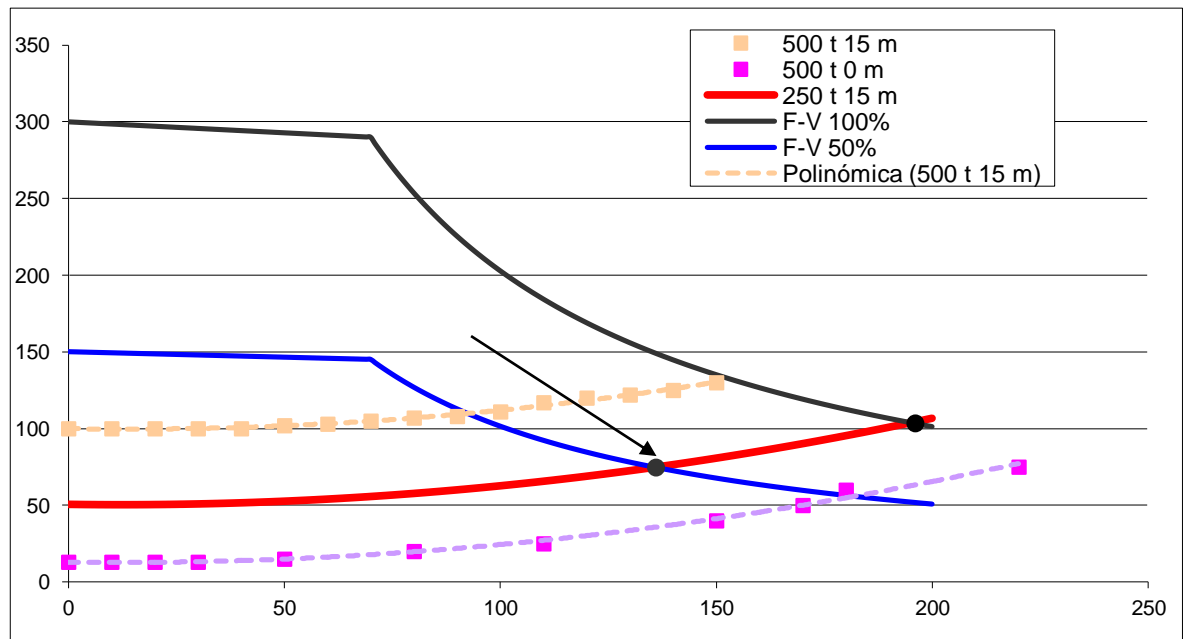


Figura 6.4. Ejemplo curva de tracción-velocidad

6.2.3. Curva de Resistencia al avance del vehículo.

El esfuerzo que debe superar el tren a diferentes velocidades para poder desplazarse viene determinado por la curva de resistencia al avance cuya ecuación se expresa en términos genéricos a continuación:

$$R=MA+MBv+Cv^2 \quad (6.9)$$

Esta ecuación recoge los 3 fenómenos básicos de la resistencia al avance:

Desnivel de la vía y masa del vehículo $\rightarrow MA$

Resistencia al rodamiento del vehículo $\rightarrow MBv$

Resistencia aerodinámica del vehículo $\rightarrow Cv^2$

Para obtener los términos que permitan obtener esta ecuación es necesario disponer de:

Las características específicas del material como la masa del vehículo, la resistencia al rodamiento y la resistencia aerodinámica que debe aportar el fabricante.

Características de la línea. El perfil de la línea aportará datos como rampas, pendientes, radios de curva, túneles, todos ellos influyentes en la curva de resistencia al avance.



La intersección de la curva par-velocidad de la máquina, tanto en tracción como en freno, con la curva de resistencia al avance determina el punto de funcionamiento y la velocidad máxima para diferentes inclinaciones de una misma línea.

En concreto, en nuestro tren CIVIA, la curva de resistencia al avance aportada por el fabricante es:

$$R = 0.01043M + 0.000031Mv + 0.000476v^2 + i * P * 0.111$$

(6.10)

R : Resistencia al avance

M : Masa

v : Velocidad

i : inclinación en (%)

P : Potencia del tren

6.2.4. Representación gráfica de los esfuerzos de tracción, freno y resistencias.

Las fuerzas que actúan sobre un tren varían con la velocidad, por lo que es muy frecuente representar en un gráfico estas fuerzas.

Cada tren se asocia a un gráfico en el que se representan:

- Las curvas de tracción (esfuerzo de tracción-velocidad), que suelen tener dos tramos, uno aproximadamente horizontal (con el esfuerzo limitado por la adherencia) y otro descendente limitado por la potencia. Un mismo tren según los grupos motores que tenga en funcionamiento puede tener diferentes curvas de tracción.
- Curvas de freno dinámico o eléctrico, que están limitadas por la adherencia, existiendo diferentes curvas para las diferentes potencias de freno de un mismo tren.
- Curvas de resistencia al avance, que son una familia de curvas paralelas, cada una de las cuales corresponde a una pendiente o rampa.

La distancia vertical entre la curva de esfuerzo y la curva de la resistencia al avance es la fuerza aceleradora del tren.

En la siguiente figura se observan las distintas curvas para distintas configuraciones incluidas la curva de tracción y la de frenado.

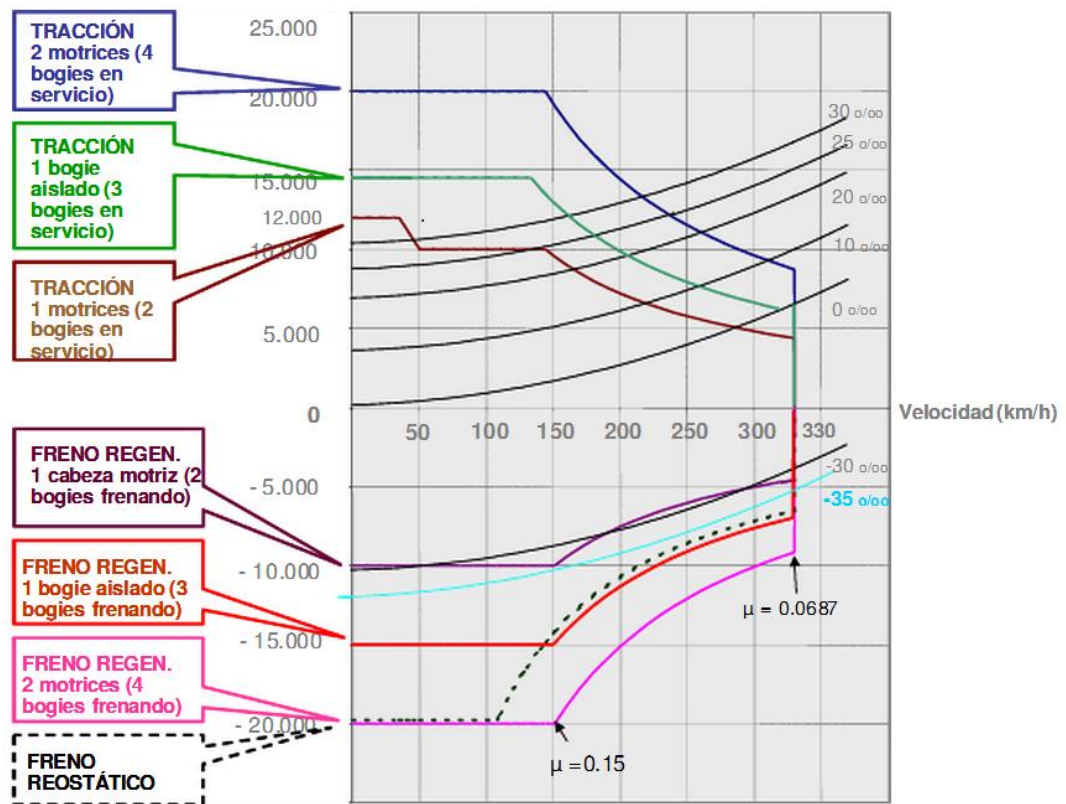


Figura 6.5. Curva esfuerzo-velocidad

6.3. CÁLCULO DE LA ENERGÍA REGENERADA POR EL TREN DE CERCANÍAS CIVIA

Se procede a realizar los cálculos de la energía regenerada por el tren de cercanías CIVIA con el fin de acumularla en la estación La Serna. Primero se deberá observar donde están colocadas las subestaciones. Los acumuladores estarán situados en la estación La Serna, aún así las estaciones cercanas podrán proporcionar energía con sus correspondientes pérdidas en la catenaria en función de la distancia.



Figura 6.6. Subestaciones de la línea de cercanías

Las subestaciones están situadas en las estaciones de Leganés y Fuenlabrada, tal y como se muestra en la Figura (6.6), observando que en ese tramo se sitúan las estaciones de La Serna y Parque Polvoranca. El siguiente paso será calcular las condiciones reales de explotación de estas dos estaciones.

6.3.2. Condiciones reales de explotación.

Para calcular de la manera más precisa posible la energía regenerada se estudiará cada situación de explotación del tren de manera independiente. Las líneas de cercanías tienen una gran diferencia de demanda dependiendo de la hora, con grandes aglomeraciones en hora punta con necesidades de transportar más de 30.000 viajeros por hora en un sentido y tráficos muy débiles con necesidades de 500 viajeros por hora

Por este motivo, y con el objetivo de conseguir un servicio óptimo y con un mayor rendimiento económico, los trenes de Cercanías de RENFE implementaron la modularidad.

El tren modular consta de tres tipos de coches, acoplados de la forma necesaria, se pueden formar trenes constituidos por 2,3,4 ó 5 coches.

Con esta fórmula se consiguen trenes idóneos para cada tipo de línea y demanda, evitando la circulación de trenes semivacíos, y así eliminar el correspondiente derroche energético y de mantenimiento. En la Figura 6.7 se muestra un CIVIA

Todos los trenes, sea cual sea su número de coches, tendrán idénticas prestaciones funcionales. En la Tabla 6.7 se muestran los datos técnicos de las diferentes combinaciones según el número de coches de los trenes CIVIA.



Figura 6.7. Tren de cercanías CIVIA

| Configuración | 2 COCHES | 3 COCHES | 4 COCHES | 5 COCHES |
|--|----------|----------|----------|----------|
| Longitud (m) | 44,8 | 65,55 | 80,3 | 98,05 |
| Peso en tara (t) | 70 | 105,8 | 11,5 | 157,3 |
| Potencia kW | 1200 | 1400 | 2100 | 2200 |
| Velocidad máxima (km/h) | 120 | 120 | 120 | 120 |
| Aceleración m/s ² 0-40 km/h | 1,2 | 1,2 | 1,1 | 1,1 |
| Deceleración freno servicio | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |
| Plazas sentadas | 126 | 169 | 223 | 277 |
| Plazas totales | 414 | 607 | 808 | 997 |

Tabla 6.7. Datos técnicos de las configuraciones del CIVIA

6.3.3. Curvas de esfuerzos tracción y freno

Se considerarán distintos casos, ya que según el horario el tren CIVIA circulará con un número de coches distinto. Esto se tendrá en cuenta a la hora de calcular la energía. Este tipo de tren modular puede estar formado por 2,3,4 ó 5 coches acoplados. La resistencia de



avance también variará ya que la masa está directamente relacionada como se ha comentado anteriormente.

Por la línea C5 de Cercanías circulan diariamente 127 trenes en cada sentido, se considerará la siguiente topología de trenes aproximada según el horario. Se tendrá en cuenta la masa en tara del vehículo y el peso de los viajeros, tomando una media de 70 kg por pasajero (0.07 t). En la Tabla 6.8 se muestra el número de trenes de cada tipo que circulan cada día por la línea C-5.

| Hora | Nº de trenes | Nº de coches | tara (t) | Nº viajeros | Peso viajeros (t) | total (t) |
|-------------|--------------|--------------|----------|-------------|-------------------|-----------|
| 05:43-06:48 | 6 | 2 | 80 | 126 | 8,82 | 88,82 |
| 06:58-09:59 | 30 | 5 | 157,3 | 1274 | 89,18 | 246,48 |
| 10:09-13:09 | 19 | 3 | 105,8 | 469 | 32,83 | 138,63 |
| 13:19-16:01 | 23 | 5 | 157,3 | 977 | 68,39 | 225,69 |
| 16:09-17:59 | 12 | 3 | 105,8 | 619 | 43,33 | 149,13 |
| 18:09-20:27 | 16 | 4 | 131,5 | 623 | 43,61 | 175,11 |
| 20:35-22:09 | 11 | 3 | 105,8 | 269 | 18,83 | 124,63 |
| 22:19-00:30 | 10 | 2 | 80 | 126 | 8,82 | 88,82 |

Tabla 6.8. Tipo de trenes que circulan por la línea C5 de cercanías diariamente

Cada una de las dos estaciones que se van a considerar consta de dos frenados, la pendiente de cada tramo será distinta, así pues estudiaremos cuatro casos con cuatro pendientes distintas. Las pendientes se sacarán de Google Earth según la fórmula de la pendiente (6.11).

$$\frac{h1-h2}{x} = i(\%) \quad (6.11)$$

Donde:

$h1$: Altura inicio

$h2$: Altura final

x : Distancia

i : Pendiente

La distancia de frenado se calculará a partir de la ecuación de movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, con una aceleración media de 0.7 m/s^2 . El tiempo de frenada es aproximadamente 45s y la velocidad inicial 120 km/h, (33,3 m/s)

$$X(t) = \frac{1}{2}at^2 + vot + Xo \quad (6.12)$$

$$X(t) = \frac{1}{2}(-0.7) \times 45^2 + 33.3 \times 45 + 0 = 789m \quad (6.13)$$

Se calculan las pendientes de los siguientes cuatro tramos, mostrados en las figuras 6.8, 6.9, 6.10 y 6.11.

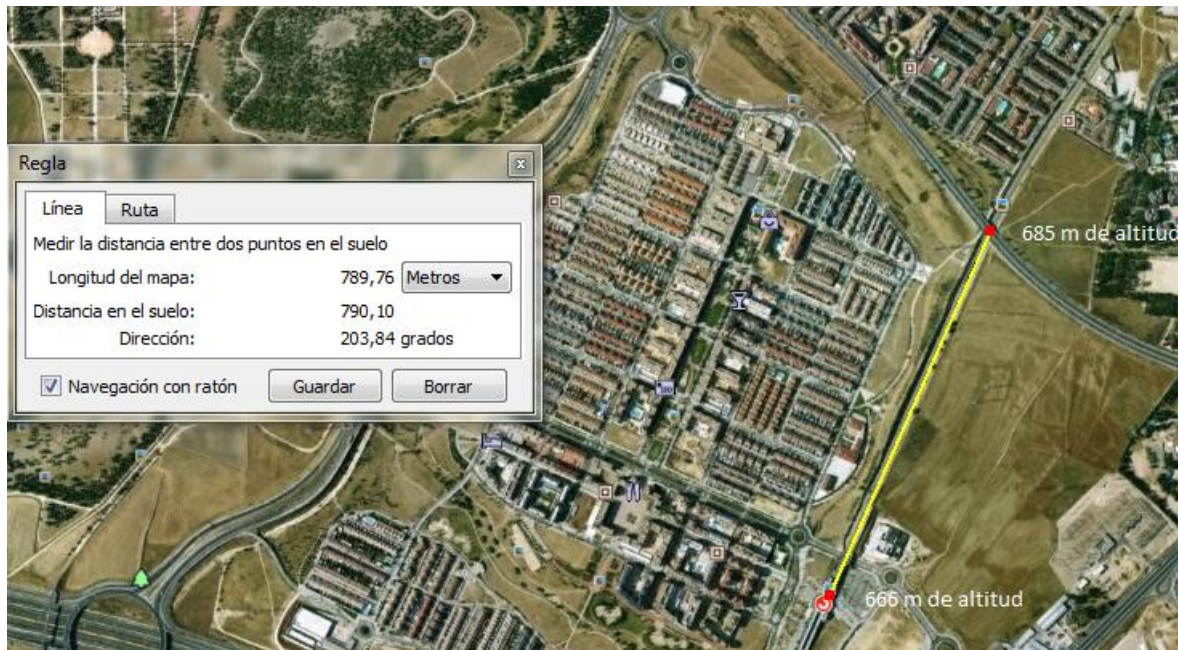


Figura 6.8. Distancia y alturas de las estaciones de cercanías Leganés- Parque Polvoranca

$$\frac{685-666}{789} = 2\% \quad (6.14)$$

La Serna-Parque Polvoranca

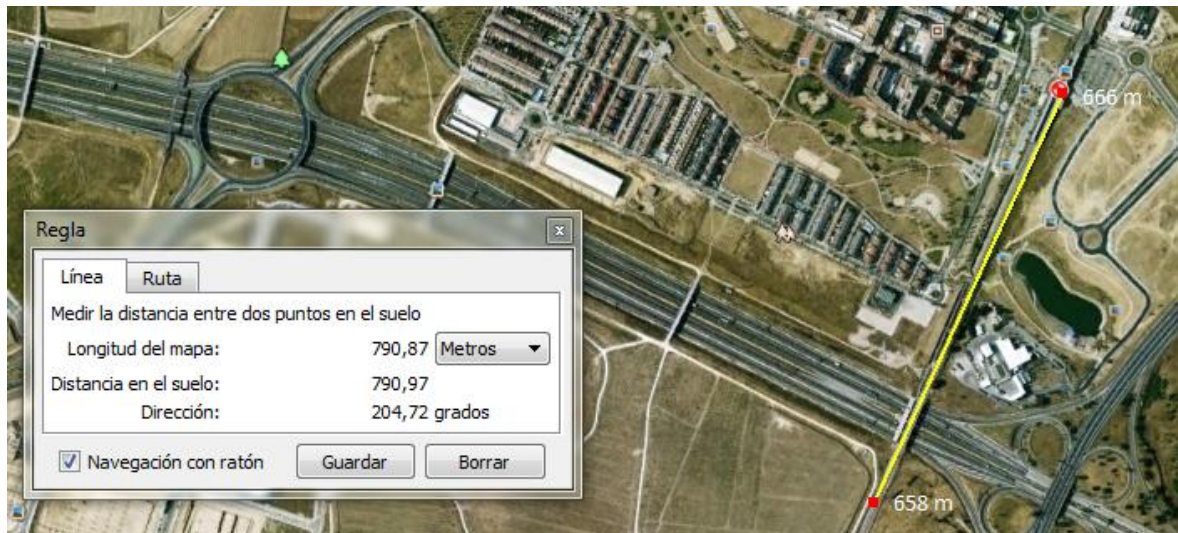


Figura 6.9. Distancia y alturas de las estaciones de cercanías. La Serna- Parque Polvoranca

$$\frac{658-666}{789} = -1\% \quad (6.15)$$

Parque Polvoranca-La Serna

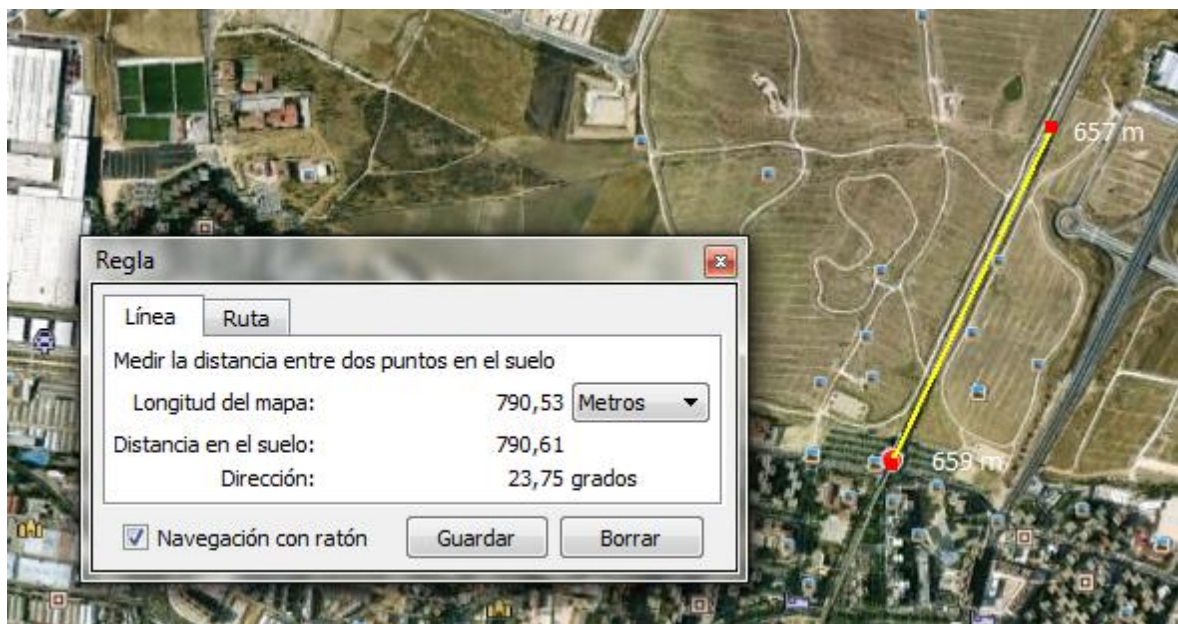


Figura 6.10. Distancia y alturas Parque Polvoranca-La Serna

$$\frac{657-659}{789} = 0\% \quad (6.16)$$

Fuenlabrada-La Serna

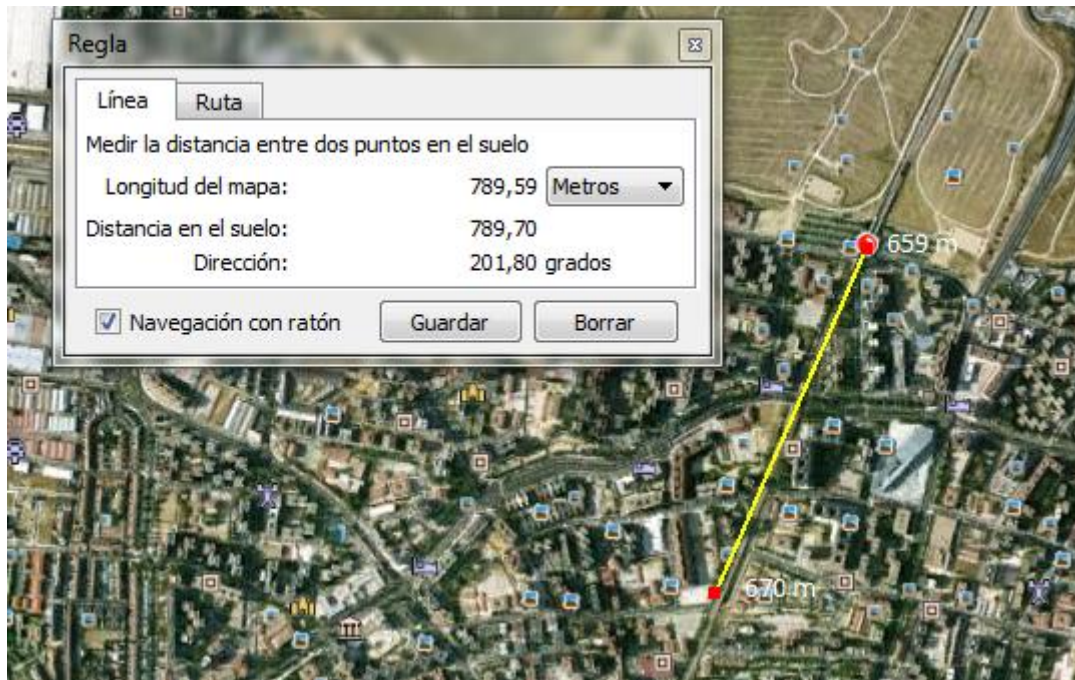


Figura 6.11. Distancia y alturas Fuenlabrada-La Serna

$$\frac{670-659}{789} = 1\% \quad (6.17)$$

6.3.4. Curvas de resistencia al avance

Las curvas de resistencia al avance de los trenes, dependen del tipo de tren, de la masa de este y de la pendiente. Estas curvas suelen ser aportadas por el fabricante. En nuestro caso tendremos 16 curvas diferentes, ya que tenemos 4 pendientes y 4 combinaciones de coches, con lo que resultan 4 masas distintas.

Normalmente tanto la curva de tracción como la de frenado se representa en el eje positivo, teniendo en cuenta que cuando se trata de la curva de frenado, esta viene multiplicada por (-1), para poder ser representada en el eje positivo.

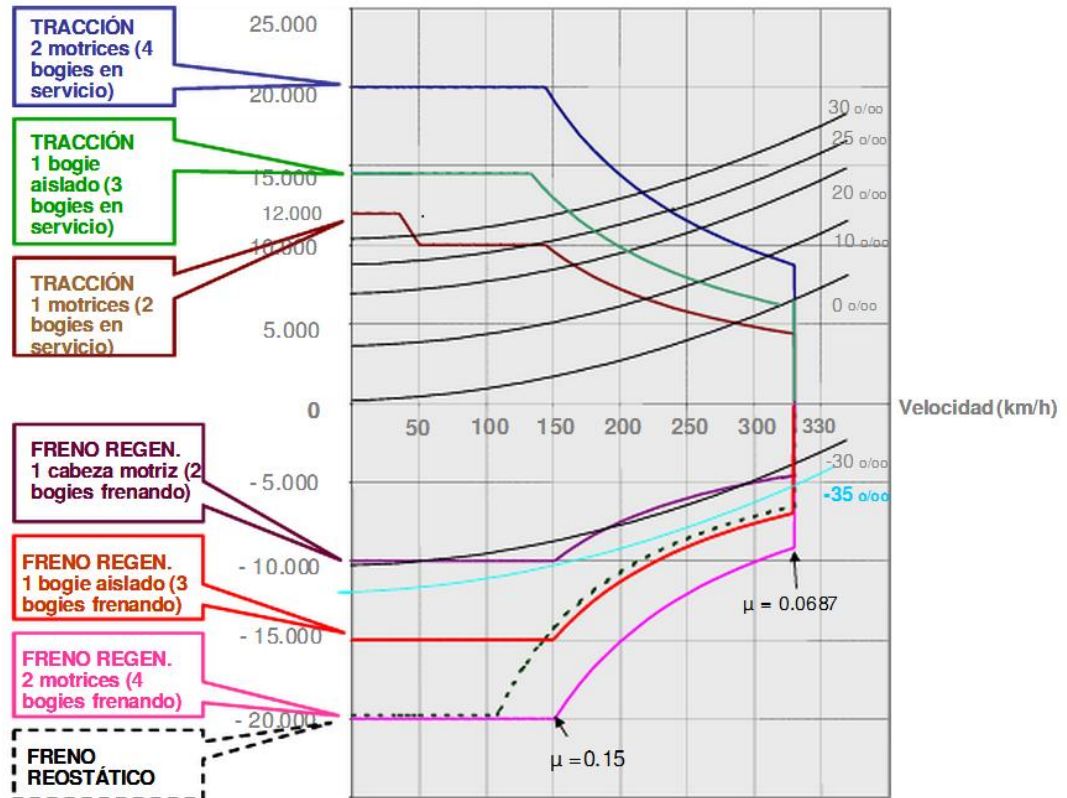


Figura 6.12. Curvas de resistencia al avance, curvas de freno y de tracción

De este modo la curva de freno nos quedaría tal y como se muestra en la Figura 6.13:

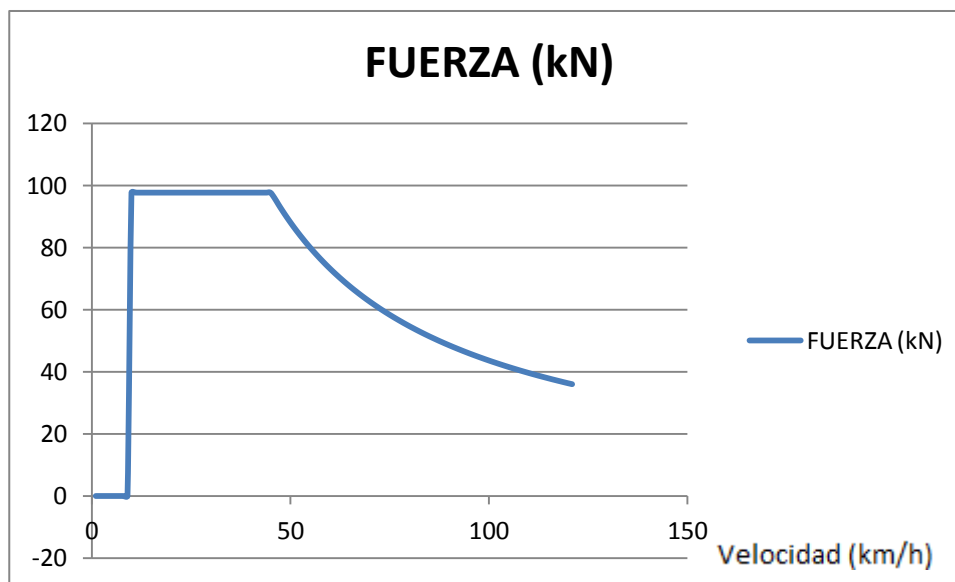


Figura 6.13. Curva de frenado

Las curvas de resistencia al avance, una vez multiplicadas por (-1) tienen la forma de la Figura 6.14, y responden a la ecuación (6.18).

$$R = AM + BMv + CMv^2 \quad (6.18)$$

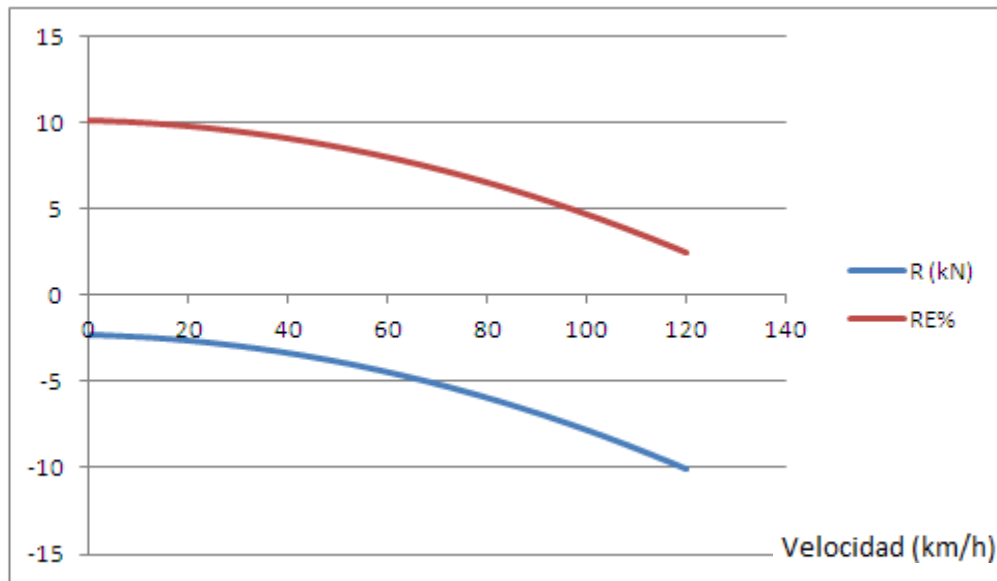


Figura 6.14. Curvas de resistencia al avance

Los datos aportados por el fabricante para los trenes CIVIA son los correspondientes a la tabla 6.9.

| $R=AM+BMv+CV2$ | |
|----------------|----------|
| A | 0,01043 |
| B | 0,000031 |
| C | 0,000476 |

Tabla 6.9. Datos del fabricante de la ecuación de la resistencia al avance del CIVIA

A, B y C son coeficientes que dependen de las características físicas del material rodante, que se miden en [daN], [daN/(km/h)] y [daN/(km/h)²]. Estos datos son aportados por el fabricante de los trenes.

El dato que nos interesa es la Energía:

$$E = P \times \Delta t \quad (6.19)$$

Donde E: Energía

P: Potencia

Δt : Incremento de tiempo

La potencia es proporcional a la velocidad y a la fuerza

$$P(kW) = F(kN) \times v\left(\frac{m}{s}\right) \quad (6.20)$$

Donde:

P: Potencia

F: Fuerza

V: velocidad

Como tenemos la Fuerza para cada punto de Velocidad, podemos calcular la potencia instantánea con la fórmula 6.20. Suponiendo que el tren frena usando su fuerza de frenado máxima, se puede calcular la velocidad del tren cada segundo. De este modo, se puede calcular la potencia regenerada para cada intervalo $\Delta t = 1s$ mediante la fórmula 6.21.

$$E(kJ) = \sum P(kW) \times \Delta t \quad (6.21)$$

Hay que tener en cuenta que la Fuerza en cada instante es la diferencia entre la curva de frenado y la curva de resistencia al avance. Como aparece en la Figura 6.15

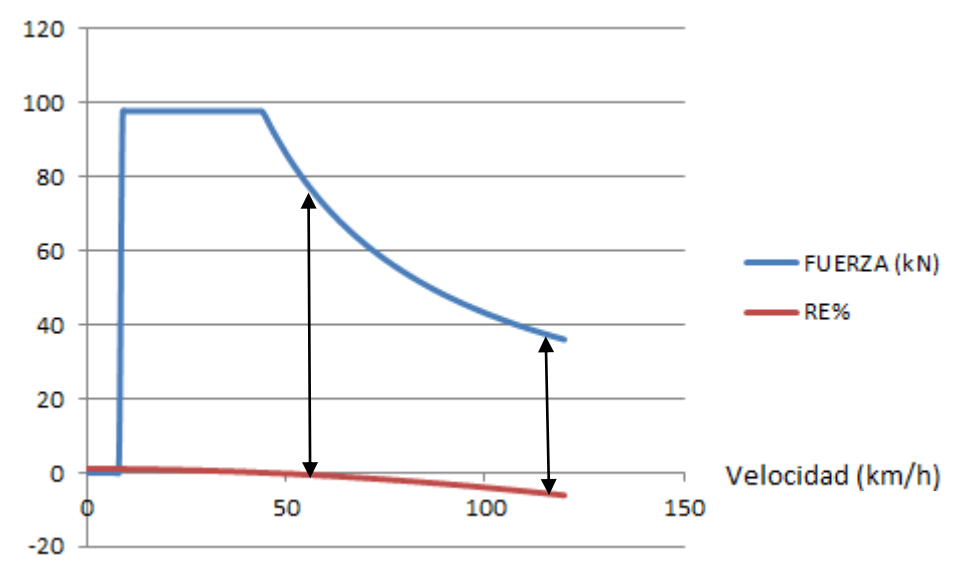


Figura 6.15. Curva de frenado y curva de resistencia al avance

Los datos iniciales que se usarán para el cálculo de la curva de energía son aportados por el fabricante:

MASA (toneladas)



Potencia (kW)

Aceleración inicial (m/s^2)

Pendiente (%)

Se puede observar que no se utilizan las mismas unidades del sistema internacional, esto es debido a la forma en que el fabricante aporta estos datos normalmente. Las conversiones de unidades se han tenido en cuenta a la hora de programar Excel.

Será necesario la Fuerza de freno para 0 km/h, este dato puede ser aportado por el fabricante o bien calculado mediante los datos anteriores.

La primera parte, la de Fuerza constante, irá desde 0 km/h hasta la Velocidad crítica. La parte de potencia constante irá desde la velocidad crítica hasta la máxima velocidad del tren, en nuestro caso 120 km/h.

Se escribirán las velocidades desde 0 km/h hasta 120 km/h, con una precisión de 1 km/h. Para cada velocidad se ha asignado una fuerza.

Para que la curva salga continua, las dos partes tienen que tener la misma fuerza para el punto de intersección, que será para la velocidad crítica.

Como el motor asíncrono no es capaz de regenerar energía a velocidades muy bajas, la fuerza será nula hasta 8 km/h.

6.3.5. Cálculo de la energía por cada tipo de tren según la pendiente y la masa

Se tienen 4 pendientes. Como se ha calculado anteriormente, en la estación de Parque Polvoranca se tendrán 2% en un sentido y -1% en el otro. En La Serna se tendrá 1% y 0%

La aceleración inicial será en todos los casos $1.1 m/s^2$

Introduciendo los datos de cada configuración de trenes y cada pendiente en el Excel programado automáticamente la energía calculada es regenerada.

Parque Polvoranca

| ESTACIÓN | PARQUE POLVORANCA |
|-----------|-------------------|
| PENDIENTE | 2% |
| Nº COCHES | 2 |
| MASA | 88,82 t |
| POTENCIA | 1200 kW |
| ENERGÍA | 13,9 kWh |

Tabla 6.10. Datos Parque Polvoranca 2coches 2%

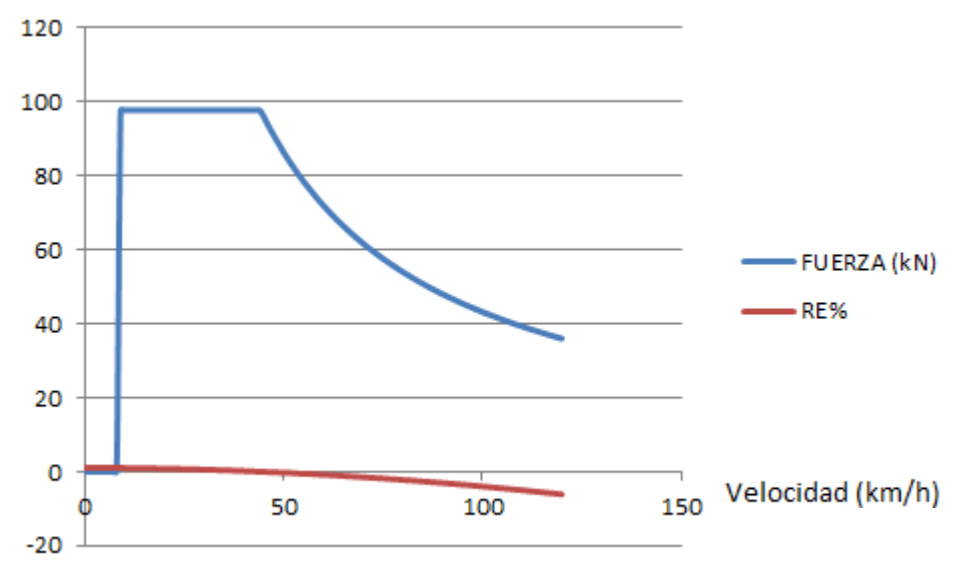


Figura 6.16. Datos Parque Polvoranca 2coches 2%

| ESTACIÓN | PARQUE POLVORANCA |
|-----------|-------------------|
| PENDIENTE | 2% |
| Nº COCHES | 3 |
| MASA | 138,63 t |
| POTENCIA | 1400 kW |
| ENERGÍA | 17,2 kWh |

Tabla 6.11. Datos Parque Polvoranca 3 coches 2%

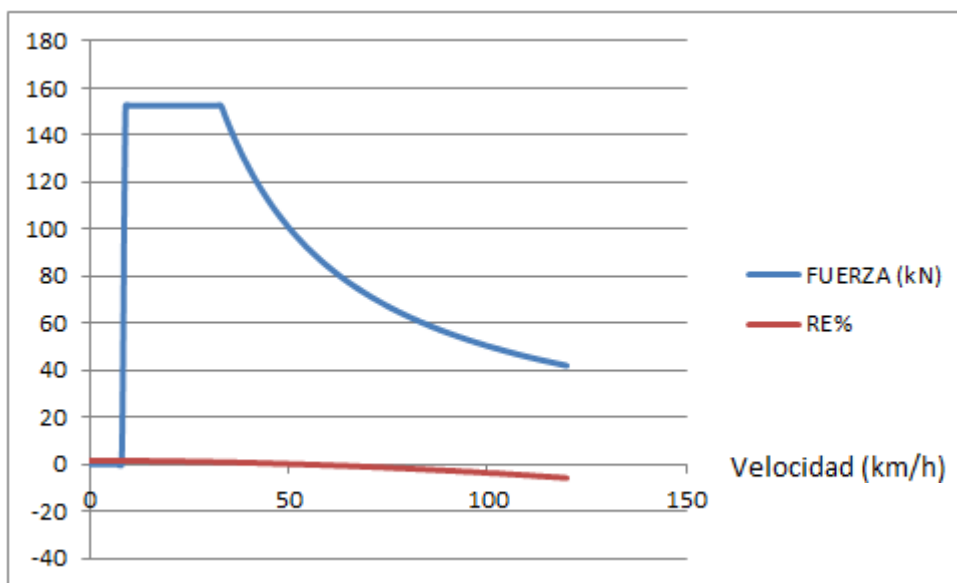


Figura 6.17. Datos Parque Polvoranca 3 coches 2%

| ESTACIÓN | PARQUE POLVORANCA |
|-----------|-------------------|
| PENDIENTE | 2% |
| Nº COCHES | 4 |
| MASA | 175,11 t |
| POTENCIA | 2100 kW |
| ENERGÍA | 25,8 kWh |

Tabla 6.12. Datos Parque Polvoranca 4 coches 2%

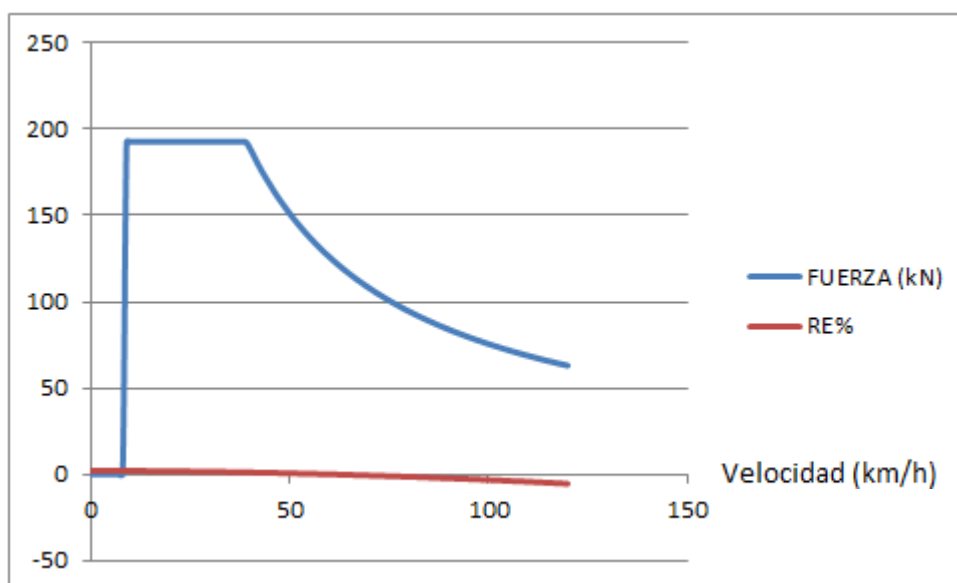


Figura 6.18. Datos Parque Polvoranca 4 coches 2%

| ESTACIÓN | PARQUE POLVORANCA |
|-----------|-------------------|
| PENDIENTE | 2% |
| Nº COCHES | 5 |
| MASA | 225,69 t |
| POTENCIA | 2200 kW |
| ENERGÍA | 26,9 kWh |

Tabla 6.13. Datos Parque Polvoranca 5 coches 2%

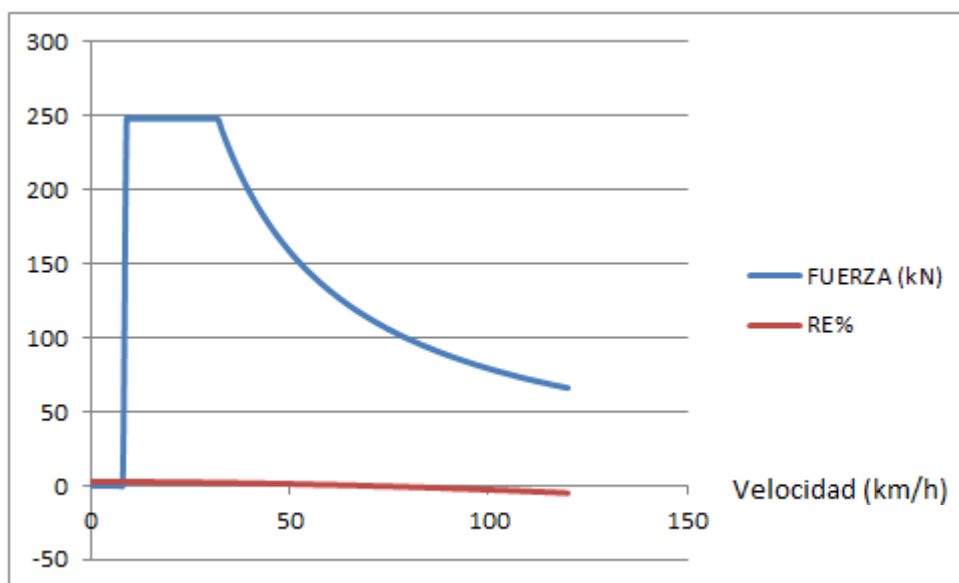


Figura 6.19. Datos Parque Polvoranca 5 coches 2%

| ESTACIÓN | PARQUE POLVORANCA |
|-----------|-------------------|
| PENDIENTE | -1% |
| Nº COCHES | 2 |
| MASA | 88,82 |
| POTENCIA | 1200 kW |
| ENERGÍA | 14,1 kWh |

Tabla 6.14. Datos Parque Polvoranca 2 coches -1%

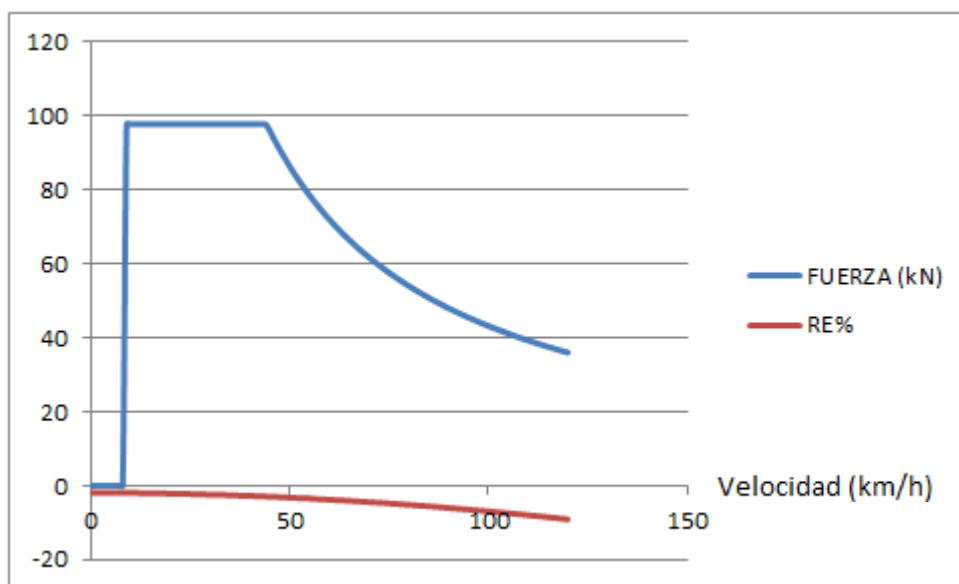


Figura 6.20. Datos Parque Polvoranca 2 coches -1%

| ESTACIÓN | PARQUE POLVORANCA |
|-----------|-------------------|
| PENDIENTE | -1% |
| Nº COCHES | 3 |
| MASA | 138,63 t |
| POTENCIA | 1400 kW |
| ENERGÍA | 18,6 kWh |

Tabla 6.15. Datos Parque Polvoranca 3 coches -1%

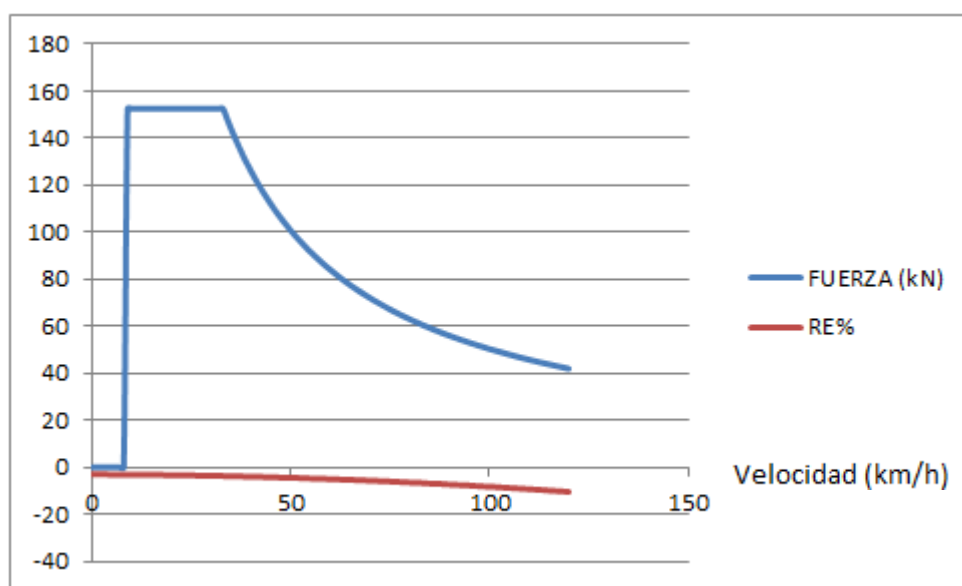


Figura 6.21. Datos Parque Polvoranca 3 coches -1%

| ESTACIÓN | PARQUE POLVORANCA |
|-----------|-------------------|
| PENDIENTE | -1% |
| Nº COCHES | 4 |
| MASA | 175,11 t |
| POTENCIA | 2100 kW |
| ENERGÍA | 26,8 kWh |

Tabla 6.16. Datos Parque Polvoranca 4 coches -1%

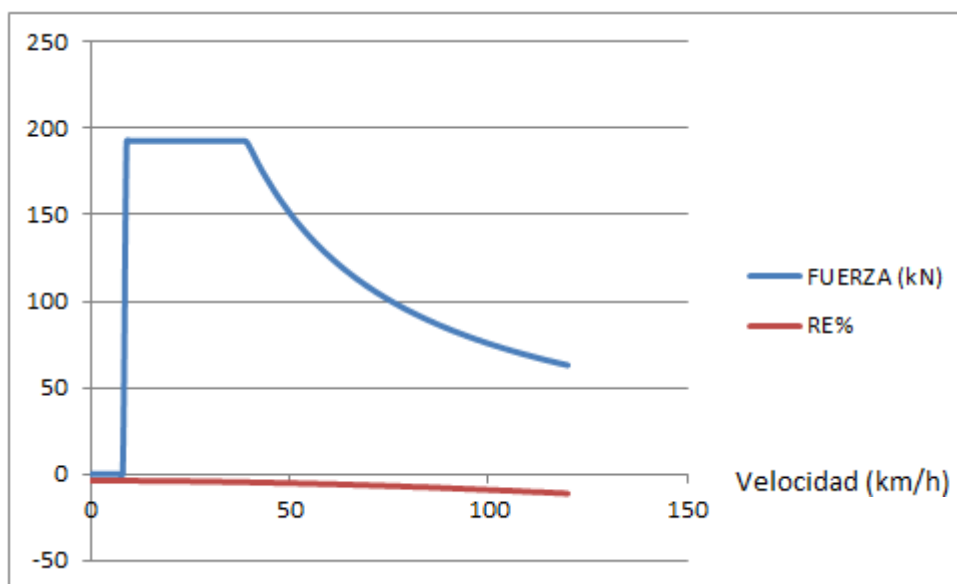


Figura 6.22. Datos Parque Polvoranca 4 coches -1%

| ESTACIÓN | PARQUE POLVORANCA |
|-----------|-------------------|
| PENDIENTE | -1% |
| Nº COCHES | 5 |
| MASA | 225,69 t |
| POTENCIA | 2200 kW |
| ENERGÍA | 29,3 kWh |

Tabla 6.17. Datos Parque Polvoranca 5 coches -1%

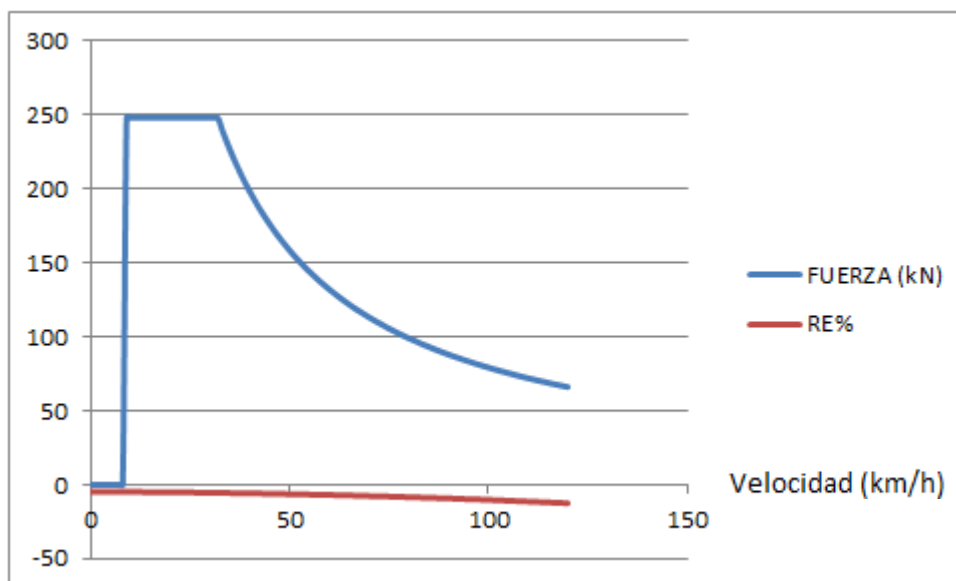


Figura 6.23. Datos Parque Polvoranca 5 coches -1%

| | |
|-----------|----------|
| ESTACIÓN | La Serna |
| PENDIENTE | 0% |
| Nº COCHES | 2 |
| MASA | 88,82 |
| POTENCIA | 1200 kW |
| ENERGÍA | 13,9 kWh |

Tabla 6.18. Estación La Serna 2 coches. 0%

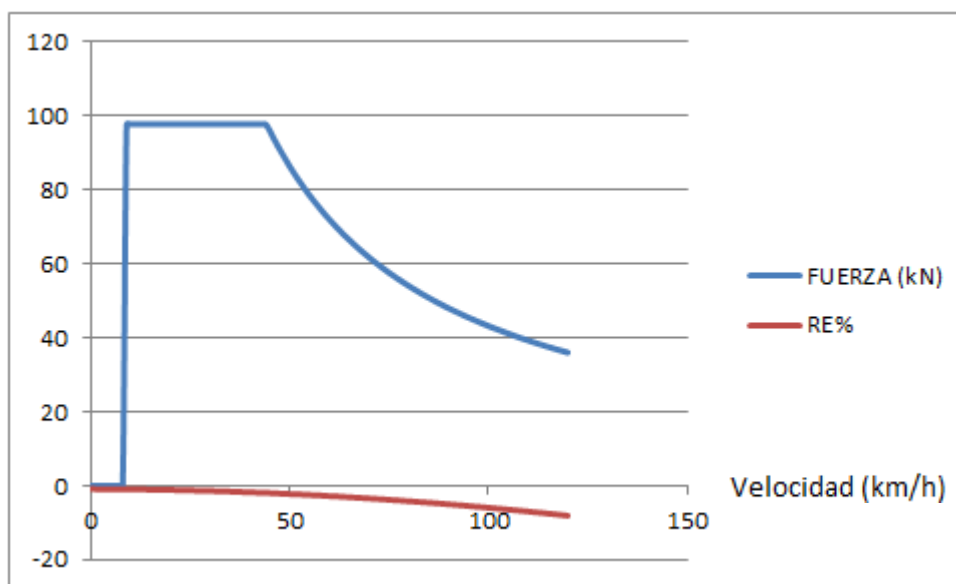


Figura 6.24. Estación La Serna 2 coches. 0%

| | |
|-----------|----------|
| ESTACIÓN | La Serna |
| PENDIENTE | 0% |
| Nº COCHES | 3 |
| MASA | 138,63 t |
| POTENCIA | 1400 kW |
| ENERGÍA | 18 kWh |

Tabla 6.19. Estación La Serna 3 coches. 0%

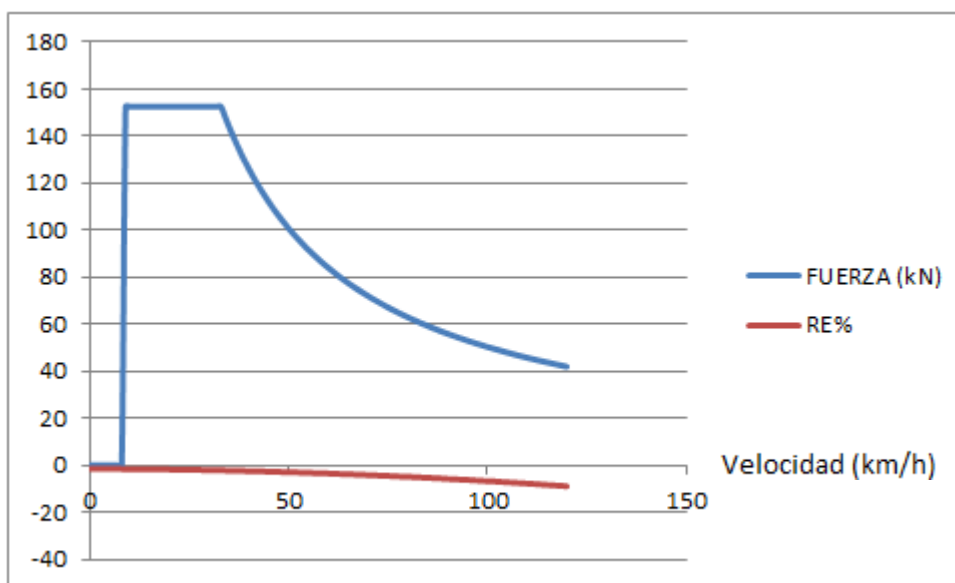


Figura 6.25. Estación La Serna 3 coches. 0%

| | |
|-----------|----------|
| ESTACIÓN | La Serna |
| PENDIENTE | 0% |
| Nº COCHES | 4 |
| MASA | 175,11 t |
| POTENCIA | 2100 kW |
| ENERGÍA | 26,6 kWh |

Tabla 6.20. Estación La Serna 4 coches. 0%

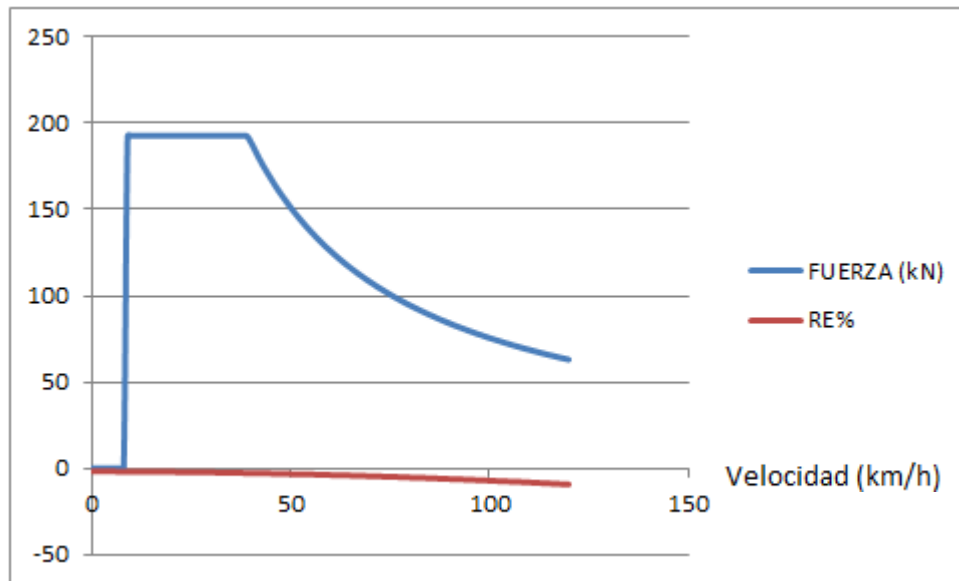


Figura 6.26. Estación La Serna 4 coches. 0%

| ESTACIÓN | La Serna |
|-----------|----------|
| PENDIENTE | 0% |
| Nº COCHES | 5 |
| MASA | 225,69 t |
| POTENCIA | 2200 kW |
| ENERGÍA | 28,5 kWh |

Tabla 6.21. Estación La Serna 5 coches. 0%

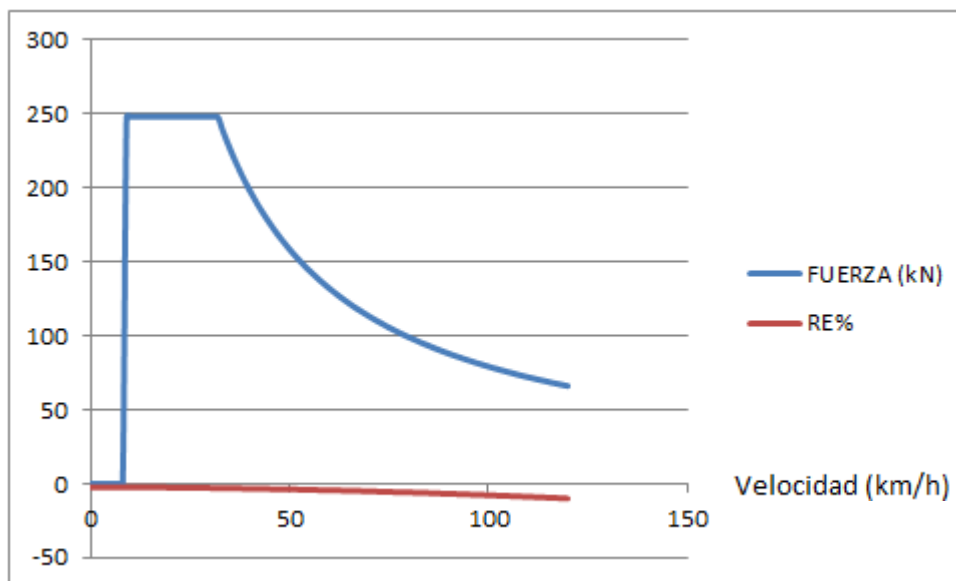


Figura 6.27. Estación La Serna 5 coches. 0%

| ESTACIÓN | La Serna |
|-----------|----------|
| PENDIENTE | 1% |
| Nº COCHES | 2 |
| MASA | 88,82 |
| POTENCIA | 1200 kW |
| ENERGÍA | 13,8 kWh |

Tabla 6.22. Estación La Serna 2 coches. 1%

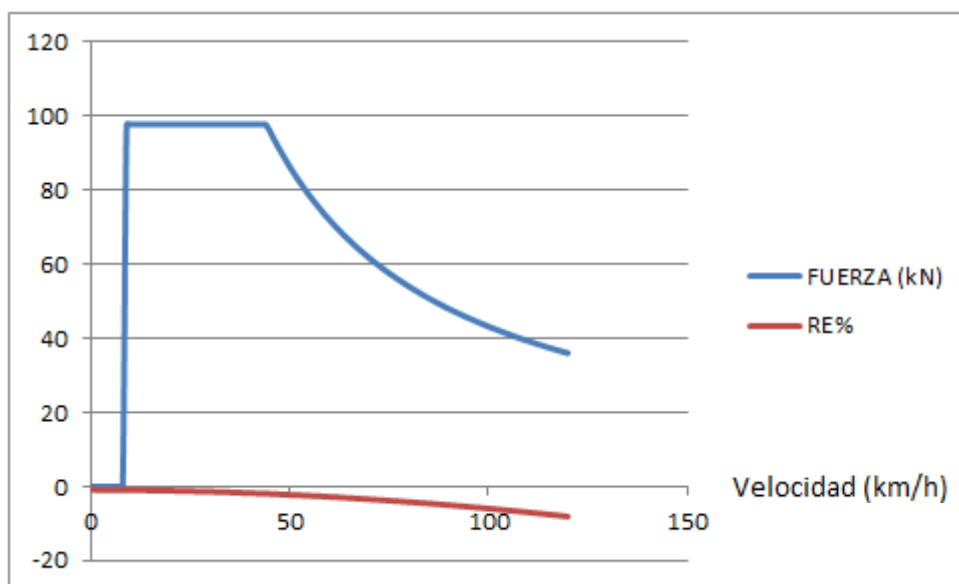


Figura 6.28. Estación La Serna 2 coches. 1%

| ESTACIÓN | La Serna |
|-----------|----------|
| PENDIENTE | 1% |
| Nº COCHES | 3 |
| MASA | 138,63 t |
| POTENCIA | 1400 kW |
| ENERGÍA | 17,8 kWh |

Tabla 6.23. Estación La Serna 3 coches. 1%

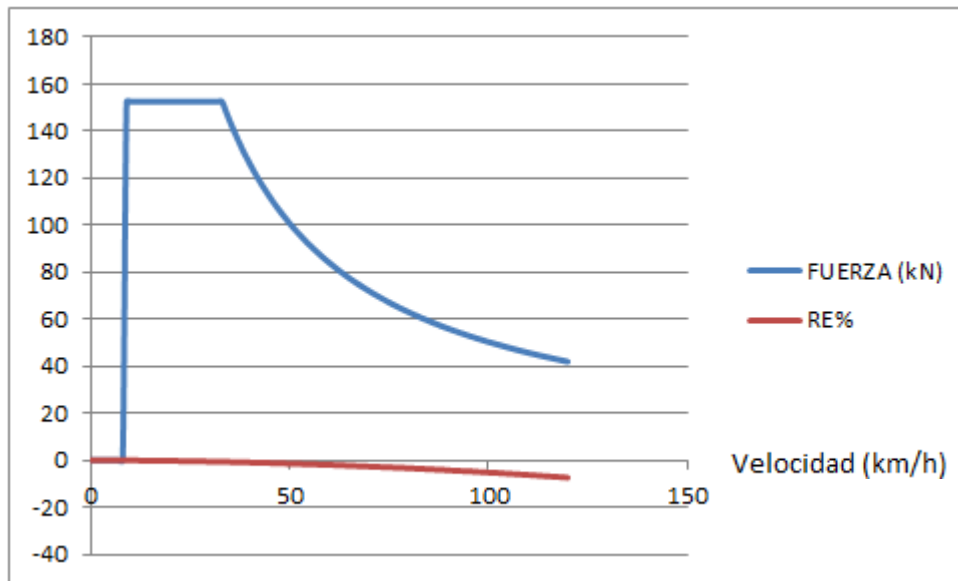


Figura 6.29. Estación La Serna 3 coches. 1%

| | |
|-----------|----------|
| ESTACIÓN | La Serna |
| PENDIENTE | 1% |
| Nº COCHES | 4 |
| MASA | 175,11 t |
| POTENCIA | 2100 kW |
| ENERGÍA | 26,2 kWh |

Tabla 6.24. Estación La Serna 4 coches. 1%

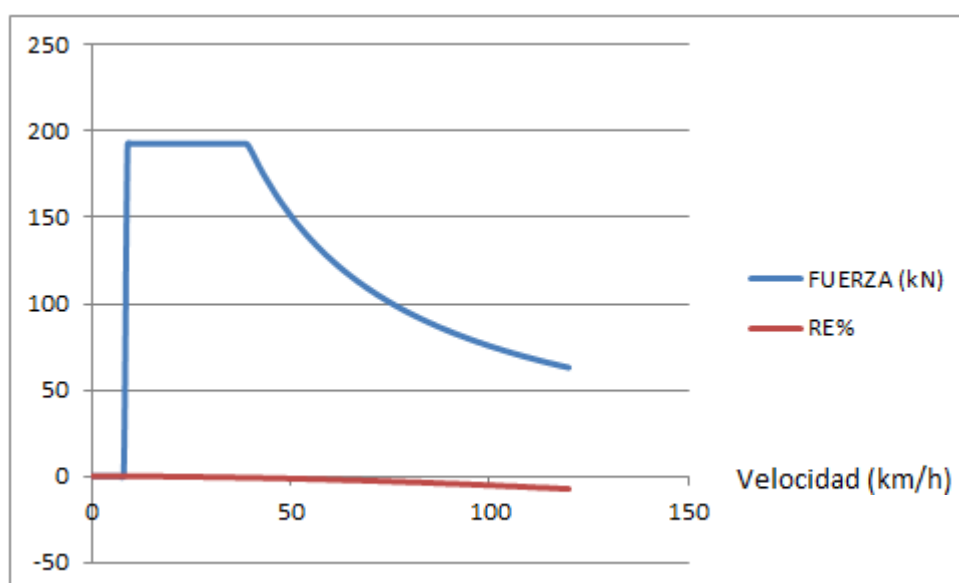


Figura 6.30. Estación La Serna 4 coches. 1%

| | |
|-----------|----------|
| ESTACIÓN | La Serna |
| PENDIENTE | 1% |
| Nº COCHES | 5 |
| MASA | 225,69 t |
| POTENCIA | 2200 kW |
| ENERGÍA | 27,7 kWh |

Tabla 6.25. Estación La Serna 5 coches. 1%

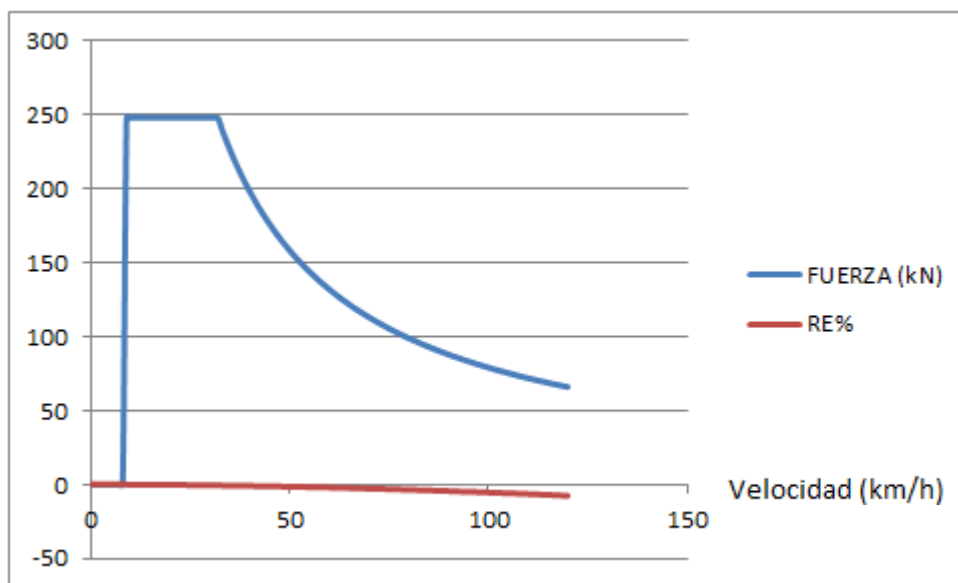


Figura 6.31. Estación La Serna 5 coches. 1%

Cálculo de energía por día

| Tipo de tren | Estación | Pendiente | Energía por cada tren (kWh) | nº trenes por día | Energía total (kWh) |
|--------------|-------------------|-----------|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| 2 coches | Parque Polvoranca | 2% | 13,9 | 16 | 222,4 |
| 3 coches | Parque Polvoranca | 2% | 17,2 | 30 | 516 |
| 4 coches | Parque Polvoranca | 2% | 25,8 | 16 | 412,8 |
| 5 coches | Parque Polvoranca | 2% | 26,9 | 53 | 1425,7 |

| Tipo de tren | Estación | Pendiente | Energía por cada tren (kWh) | nº trenes por día | Energía total (kWh) |
|--------------|-------------------|-----------|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| 2 coches | Parque Polvoranca | -1% | 14,1 | 16 | 225,6 |



Aprovechamiento de la energía de frenado regenerativo de
los trenes de cercanías en las estaciones La Serna y Parque Polvoranca

| | | | | | |
|----------|-------------------|-----|------|----|--------|
| 3 coches | Parque Polvoranca | -1% | 18,6 | 30 | 558 |
| 4 coches | Parque Polvoranca | -1% | 26,8 | 16 | 428,8 |
| 5 coches | Parque Polvoranca | -1% | 29,3 | 53 | 1552,9 |

| Tipo de tren | Estación | Pendiente | Energía por cada tren (kWh) | nº trenes por día | Energía total (kWh) |
|--------------|----------|-----------|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| 2 coches | La Serna | 0% | 13,9 | 16 | 222,4 |
| 3 coches | La Serna | 0% | 18 | 30 | 540 |
| 4 coches | La Serna | 0% | 26,6 | 16 | 425,6 |
| 5 coches | La Serna | 0% | 28,5 | 53 | 1510,5 |

| Tipo de tren | Estación | Pendiente | Energía por cada tren (kWh) | nº trenes por día | Energía total (kWh) |
|--------------|----------|-----------|-----------------------------|-------------------|---------------------|
| 2 coches | La Serna | 1% | 13,8 | 16 | 220,8 |
| 3 coches | La Serna | 1% | 17,8 | 30 | 534 |
| 4 coches | La Serna | 1% | 26,2 | 16 | 419,2 |
| 5 coches | La Serna | 1% | 27,7 | 53 | 1468,1 |

| | |
|---------------------------|------------|
| Energía Parque Polvoranca | 5342,2 kWh |
| Energía La Serna | 5340,6 kwh |

Tabla 6.26. Cálculo de la energía por cada día

Tal como se muestra en la tabla 6.26 la energía regenerada en la estación Parque Polvoranca corresponde a 5342,2 kWh y 5340,6 kWh para la estación La Serna. Actualmente el 53% de esa energía es aprovechada por los trenes que están traccionando al mismo tiempo que se regenera la energía. (CAF)

La energía que se necesitará almacenar será el 47% de la energía regenerada en la estación Parque Polvoranca, y un 10% del 47% de la energía regenerada en la estación La Serna. De la estación La Serna solo se utilizará el 10% debido a la distancia acorde con proyectos similares, ya que los SC se colocarán en la estación Parque Polvoranca. Por lo tanto la energía total a almacenar será 2510 kWh + 250kWh. (“Estudio del aprovechamiento de la Energía Regenerada por los Trenes Diego Lopez”) [17].

Dimensionaremos los SC para una energía de 2000 kWh. En el caso de que se regenerara más energía, los trenes disponen de resistencias de disipación.

Una vez teniendo la energía que se quiere almacenar, se calcula la capacidad necesaria de los SC con la fórmula:

$$E = \frac{1}{2} Ceq \left(\frac{3}{4} V \right)^2 \quad (6.22)$$

Donde:

E= Energía total (Wh)

Ceq= Capacidad total de los SC (F)

V= Voltaje (V)

Tenemos 150 V y 2000kWh

Dimensionaremos los SC con una Capacidad de 866 Faradios.

Después de analizar diferentes sistemas y empresas de almacenaje de energía por SC, se ha decidido optar por el sistema SITRAS SES de Siemens, el cual usa módulos con SC fabricados por Maxwell.



Figura 6.32. Stationary Energy Store (SES)

Usaremos módulos de 6 condensadores en serie, de 15V y 433F cada uno. Para alcanzar una tensión de 150 V se conectarán 10 módulos en serie. Con el objetivo de alcanzar una corriente mayor y almacenar mayor cantidad de energía se conectarán 20 módulos serie de 150 V en paralelo. Todo el conjunto será instalado en armario de forma similar al esquema mostrado en la figura 6.32. La tensión total del conjunto es de 150V y la capacidad 866F.



La energía almacenada se usará para alimentar otros trenes y lo que sobre se usará para cargar vehículos eléctricos (VE), de este modo fomentar el uso de estos.

Este sistema de almacenaje de energía mediante ultracondensadores, ayudará a evitar posibles cortes de tensión en caso de una excesiva demanda de energía en horas punta. Además ayudará a ahorrar hasta un 30% de energía consumida por los trenes en dicha estación y ayudará a estabilizar la tensión. (*Sitras* ® *MES (Siemens Transportation)* [18].

Se estima que el 60% de la energía almacenada en los SC será usada para traccionar trenes, y el 40% se usará para cargar vehículos eléctricos.

De los 2750 kWh diarios, 1650 kWh se destinarán al arranque de trenes y 1100 kWh a la carga de VE.

6.4. ESTACIONES DE RECARGA PARA VE

La industria del automóvil es una industria global. Actualmente el sector del automóvil se encuentra en un escenario económico bastante complejo. Por un lado, la demanda a nivel global ha disminuido, por otro, la situación del sistema financiero es complicada y por último, se requieren grandes esfuerzos inversores para desarrollar tecnologías limpias. La industria del automóvil es considerada como impulsora del crecimiento económico y del empleo. Asimismo, y a pesar de la situación actual, existen oportunidades para los fabricantes de equipos y componentes que inviertan en innovación en los ámbitos de seguridad, tecnologías de ahorro de combustible, materiales ligeros, vehículos eléctricos e híbridos, etc., en colaboración con los fabricantes de vehículos.

La brusca aparición del vehículo eléctrico viene condicionada principalmente por factores externos tales como la necesidad de limitar nuestra dependencia del petróleo y la urgente necesidad de reducir las emisiones de CO₂.

Una de las soluciones a estos requerimientos es el vehículo eléctrico, el cual está sirviendo para establecer nuevas propuestas tecnológicas y nuevos modelos de negocio. La forma de recargar el vehículo, las tecnologías y servicios asociados, se convierten en nuevas oportunidades de negocio.

Es necesario impulsar el VE, desarrollar una economía basada en el conocimiento y la innovación y promover una economía más eficiente en el uso de los recursos, más ecológica y más competitiva. Donde se desarrollen tecnologías para modernizar el sector del transporte y eliminar sus emisiones de carbono y contribuir con ello a ganar competitividad.

6.5. INFRAESTRUCTURA DE RECARGA

Los consumidores deberán disponer de puntos de carga abiertos al público que satisfagan sus necesidades en lo que a carga de baterías se refiere. Para disponer de una red de carga eléctrica adecuada será necesario hacer una inversión significativa.

La demanda de infraestructura de recarga irá en crecimiento en consonancia con la penetración del VE en el mercado. Nadie comprará un VE si no puede recargarlo con facilidad. De ahí los pilotos que se están desarrollando en Madrid, Sevilla, Barcelona, entre otras. Es fundamental un despliegue de infraestructura de recarga, en todos sus modos, si se quiere que en unos años haya presencia real de vehículos eléctricos.

La principal recarga será la nocturna, estudios indican un índice del 40%, desde una recarga “tonta”, enchufar y cargar, hasta una recarga inteligente a través de la información conjunta de información del usuario, del tiempo de permanencia y de uso de la red. Asimismo la recarga en centros de trabajo, estimada en un 35% será también motivo de un importante despliegue de infraestructura tanto a nivel eléctrico como de información y automatización inteligente.

En estos momentos varios modelos de estaciones de carga en diferentes países están en el mercado. Aunque son diferentes podemos establecer una cierta clasificación atendiendo a las tipologías de carga que se presentan:

- Carga lenta: son postes en corriente alterna monofásica con potencias entre 3-7 kW, comprendidos en 6-8 horas.
- Carga estándar hasta 22 kW. Tiempo comprendido entre 3-4 horas
- Carga rápida: postes en corriente continua y con potencias mayores de 50 kW, algunos estudios indican que podrán llegar hasta los 250 kW.

Hay tres escenarios para la recarga, y en consecuencia productos diferentes que han sido o habrá que desarrollar. A continuación se mencionan dichos escenarios:

- Postes de recarga inteligentes para el entorno doméstico.
- Postes de recarga inteligentes para centros de trabajo.
- Postes de recarga inteligentes para calles y centros comerciales con unas características diferenciadas debido a su ubicación.

- Postes de recarga ultrarrápida para una implantación efectiva del coche eléctrico, posibilitando un uso convencional del vehículo.

En el presente proyecto se van a mezclar los escenarios de recarga en centros de trabajo con los postes de recarga para calles. Centrándose en aquel usuario que viaja en tren a su entorno laboral usando el coche para acercarse a la estación ferroviaria más cercana. La ventaja de este sistema es que la electricidad vendrá en gran parte de la energía generada de los trenes al frenar la cual suele ser desaprovechada.

Una batería utilizada en VE consume entre 10-50 kWh, que durante la recarga hacen que la potencia consumida varíe entre 3 kW y 100 kW. Disponemos de 1100 kWh diarios, que nos permitirá instalar 10 puntos de recarga tipo lento y 5 del tipo lento rápido. En la figura 6.33 se muestra un esquema general de montaje de los puntos de recarga.



Figura 6.33. Ejemplo punto de recarga gestionado por un Gestor (Adif)



7. PRESUPUESTO

En la inversión inicial se tendrán en cuenta todos los elementos necesarios para la puesta en marcha del sistema de reutilización de la energía.

| Descripción | Unidad | Medición | Precio Unitario | Precio Total |
|--|--------|----------|-----------------|------------------|
| Cargador modelo EV Link de Schneider Electric, de 500 V a 125 A proporcionando una potencia de 50 kW por cargador a la salida. | Ud. | 8 | 22.000 € | 176.000 € |
| Ingeniería de detalle para construcción, 8 horas al día de Lunes a Viernes durante 4 meses. | Horas | 640 h | 87 €/h | 55.680 € |
| Centro de transformación | Ud. | | | 51.000 € |
| Cuadros eléctricos | Ud. | | | 7.000 € |
| Seguridad y salud | | | | 9.000 € |
| Siemens Stationary Energy Store | Ud. | | | 60.000 € |
| TOTAL | | | | 358.680 € |

8. CONCLUSIONES

Cada día está tomando más importancia el ahorro energético, por motivos económicos y medio ambientales. A día de hoy todavía se desaprovecha mucho la energía regenerada por los trenes. Es difícil calcular con exactitud la energía generada por los trenes, pero si se puede hacer una estimación según el tipo de tren, el tipo de vía, velocidad y peso. De este modo se puede estimar cuanta energía se podría regenerar mediante el aprovechamiento del frenado de los trenes.

En este proyecto se ha desarrollado una herramienta de cálculo en Excel que permite estimar la energía regenerada por cualquier tren, a partir de sus características constructivas y de la pendiente del tramo a recorrer. Los datos obtenidos se acercan mucho a los datos suministrados por CAF en otras estaciones.

Por medio de un estudio de viabilidad se ha determinado que las estaciones de la Serna y Parque Polvoranca son las más apropiadas de la red de cercanías de Madrid para regenerar la energía de frenado de sus trenes. Los datos de estas estaciones se han introducido en la herramienta diseñada para calcular la energía diaria que se podría regenerar en dichas estaciones.

Para aprovechar la energía generada en las estaciones estudiadas se ha propuesto un sistema de almacenamiento de energía basado en ultracondensadores que permite almacenar la energía de frenado. También se propone que la energía almacenada pueda ser utilizada como ayuda a la tracción de trenes y la energía sobrante sea utilizada para la carga de vehículos eléctricos. Los resultados de las simulaciones muestran que podrían instalarse un total de 15 puntos de recarga (10 de carga lenta y 5 de carga rápida).



9. BIBLIOGRAFIA

- [1] CIVIA Manual 2012.
- [2] Renfe Regionales 2009
- [3] O.Bach. Alstom. Especificación funcional de freno.2006

- [4] Railtech 96. (1996) *Railway traction and braking*. Bury St. Edmunds: Institution of Mechanical Engineers.
- [5] Vassillios, A. (2000) *Railway engineering*. V.A Profillidis: Averbury Technical.
- [6] Halmos, S. (2006) *Implementation of PLC* [online] available from <http://www.cb-rail.com/modurail4_E2.htm> [01 December 2010]
- [7] Stehly, M. (2008) *Train Resistance and Railroad Emissions and Efficiency* [online] available from < http://ict.illinois.edu/railroad/CEE/pdf/PPT's/fall08/Stehly_10-24.pdf> [10 December 2010]
- [8] Harkins, J. (2002) *Trams beyond the wire* [online] available from <http://www.lightrailuk.com/pdf/trams_beyond_the_wire.pdf> [06 December 2010]
- [9] Gennadievich, V. (2002) *Trams beyond the wire* [online] available from <http://www.lightrailuk.com/pdf/trams_beyond_the_wire.pdf> [06 December 2010]
- [10] Lindgreen, e., and Vaiciunas, G. (2009) *Elaboration of methodology for calculation of traction power-supply system with the help of renewal stream theory* [online] available from < http://www.vgtu.lt/upload/leid_konf/kuznetsov_123-128.pdf> [28 January 2011]
- [11] Lawyer, D. (2004) *Electric Railroads* [online] available from <http://www.lafn.org/~dave/trans/rail/electric_rr.html#toc4.2> [07 November 2010]
- [12] Vasquez, R.L. and Cera, L. (2005) *Multi-Line Power Flow Control: An Evaluation of the GIPFC (Generalized Interline Power Flow Controller)* [online] available from <http://www.ipst.org/TechPapers/2005/IPST05_Paper079.pdf> [20 November 2010]
- [13] Railway Technology (2011) *Net Resources International* [online] available from <<http://www.railway-technology.com/mediapacks/Sites/48/>> [05 November 2010]
- [14] Bellis, M. (2011) *Interleaving The history of railroad innovations* [online] available from < <http://inventors.about.com/library/inventors/blrailroad.htm>> [10 November 2010]



- [15] Rodríguez, C. (2006) *Trenes metropolitanos rotativas: Sincronización de arranques y paradas en metropolitanos para el uso eficiente del frenado* [online] available from <www.iit.upcomillas.es/~aramos/papers/ponenciaSitges.pdf> [15 November 2010]
- [16] Koroblowski, P. (1999) *New catenary renewal technology introduced on Polish State Railways* [online] available from <http://www.plassertheurer.com/pdfs/publications/rei_0002.pdf> [20 Decembar2011]
- [17] Lopez, D. (2010) *Estudio del aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes* [online] available from <<http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4c1e96c05ed91.pdf>>
- [18] SISTRAS SES [online] available from <http://w3.siemens.com.cn/mobility/cn/zh/mediapoolcontent/Documents/Sitras%20SES_en.pdf>